https://doi.org/10.55764/2957-9856/2026-3-156-173.42

МРНТИ 39.23.15
УДК 551.583; 556.13

Ж. К. Наурозбаева[1], Г. Е. Монкаева[*2], М. А. Жунисова[3], Н. Е. Рахматулла[4], К. С. Оразбекова[5]

[1] PhD руководитель лаборатории региональных климатических изменений (АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; *naurozbaeva.zhanar@mail.ru*)
[2] [*]Научный сотрудник (АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; ***erzanovasara@gmail.com***)
[3] Научный сотрудник (АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; *makpal80@mail.ru*)
[4] Младший научный сотрудник (АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; *nurkanat.rakhmatulla@mail.ru*)
[5] PhD, главный ученый секретарь (АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; *Kuralay_orazbekova@mail.ru*)

СОВРЕМЕННОЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ЗАСУШЛИВОСТИ И ИСПАРЕНИЯ ШУ-ТАЛАССКОГО БАССЕЙНА

Аннотация. Выполнена комплексная оценка пространственного распределения потенциальной эвапотранспирации (ET_0), фактического испарения (Ea), индекса аридности (AI) и климатического дефицита влаги в Шу-Талласском бассейне за климатический период 1991–2020 гг. ET_0 рассчитана методом FAO-56 Пенмана–Монтейта, фактическое испарение – на основе уравнения М. И. Будыко, условия засушливости оценены с использованием индекса аридности по классификации UNEP, а пространственный анализ выполнен средствами ГИС-технологий. Установлено, что ET_0 изменяется от 861 до 1307 мм/год, фактическое испарение – от 156 до 440 мм/год, индекс аридности – от 0,13 до 0,58, а климатический дефицит влаги от 363 до 1039 мм/год. Наиболее выраженная аридность характерна для западных и северо-западных равнинных районов бассейна, где повышенная испарительная потребность атмосферы сочетается с недостаточным количеством осадков, формируя низкие значения AI, высокий климатический дефицит и ограничивая фактическое испарение. В направлении южных и юго-восточных предгорных районов значения AI и Ea возрастают, а климатический дефицит преимущественно уменьшается вследствие улучшения условий атмосферного увлажнения и снижения ET_0. Пространственная дифференциация исследуемых характеристик определяется совместным влиянием температуры и режима выпадения осадков, радиационных и ветровых условий, орографии и местной атмосферной циркуляции. Полученные результаты позволяют выделить наиболее климатически уязвимые территории и могут быть использованы при оценке водообеспеченности, районировании климатических рисков и планировании рационального использования водных ресурсов Шу-Талласского бассейна.

Ключевые слова: Шу-Таласский бассейн, потенциальная эвапотранспирация, индекс аридности, климатический дефицит влаги, изменение климата.

Введение. В условиях продолжающегося изменения климата оценка пространственного распределения засушливости и испарения приобретает особое значение для аридных и семиаридных территорий [1]. Повышение температуры воздуха изменяет условия испарения, увеличивает потребность атмосферы во влаге и при ограниченном количестве осадков усиливает

климатический дефицит увлажнения. В результате даже сравнительно небольшие изменения температуры, влажности воздуха, скорости ветра и радиационного баланса способны приводить к заметной трансформации испаряемости, водного баланса и влагообеспеченности территории [2].

Испарение и потенциальная эвапотранспирация являются не только климатическими характеристиками, но и важнейшими расходными составляющими водного баланса, определяющими доступность воды для поверхностного стока, почвенного увлажнения, растительности, орошаемого земледелия и водохозяйственного комплекса [3].

Для засушливых регионов проблема оценки испарения тесно связана с понятием аридности. Условия засушливости формируются в результате совместного действия приходной части водного баланса, представленной атмосферными осадками, и климатически обусловленного расхода влаги на испарение. Поэтому анализ только годовых сумм осадков не позволяет в полной мере оценить состояние влагообеспеченности [4].

Особую актуальность эта проблема имеет для Центральной Азии, где водные ресурсы формируются преимущественно в горных районах, а основной объем водопотребления сосредоточен в засушливых равнинных и предгорных зонах. Горные системы Тянь-Шаня выполняют функцию аккумуляции влаги и формирования стока за счет снеговых и ледниковых ресурсов, тогда как нижележащие территории характеризуются высокой испаряемостью и хроническим дефицитом естественного увлажнения [5].

Шу-Таласский водохозяйственный бассейн является одним из наиболее уязвимых трансграничных бассейнов Центральной Азии. Он охватывает территории Республики Казахстан и Кыргызской Республики и отличается выраженной горно-равнинной структурой. Истоки рек Шу и Талас расположены в высокогорных зонах Северо-Западного Тянь-Шаня, тогда как значительная часть водопотребления приходится на предгорные и равнинные территории Казахстана. Вследствие этого устойчивость водообеспечения нижнего течения зависит не только от количества поступающего трансграничного стока, но и от потерь воды на испарение, климатической засушливости, сроков снеготаяния и сезонного распределения атмосферных осадков [6].

Рост температуры воздуха, изменение сезонного распределения осадков, сокращение продолжительности снежного периода и усиление испарения способны нарушать сложившееся соотношение между поступлением и расходованием влаги [7].

Климат казахстанской части бассейна характеризуется резкой континентальностью, значительными сезонными амплитудами температуры, малым количеством осадков на равнинах и выраженной вертикальной поясностью. По мере увеличения высоты местности температура воздуха и потенциальное испарение, как правило, уменьшаются, тогда как количество осадков возрастает под влиянием орографического подъема воздушных масс. Такое сочетание формирует контрастную пространственную структуру увлажнения: от наиболее засушливых пустынных и полупустынных территорий в пределах Мойынкума и нижних частей бассейна до относительно более обеспеченных влагой предгорных и горных районов. Следовательно, для бассейна недостаточно использовать единое среднеплощадное значение испарения или индекса аридности, необходима пространственно дифференцированная оценка [8].

Выполненный многолетний анализ климатических условий Шу-Таласского бассейна показал устойчивое повышение температуры воздуха и изменение режима атмосферных осадков. При переходе от базового периода 1961-1990 гг. к современному 1991-2020 гг. среднегодовая температура воздуха в казахстанской части бассейна повысилась на 0,9 °С. Наиболее выраженное потепление наблюдалось зимой и весной, когда повышение составило соответственно 1,2 и 1,1 °С. Одновременно годовая сумма осадков уменьшилась на 8,6 мм, а наиболее существенное сокращение было характерно для весеннего сезона. Эти изменения свидетельствуют о формировании неблагоприятного сочетания факторов: увеличения тепловых ресурсов атмосферы при снижении поступления влаги в периоды, наиболее значимые для формирования стока, почвенного увлажнения и начала вегетации [9].

Изменение температурного режима оказывает на испарение как прямое, так и косвенное влияние. Повышение температуры увеличивает давление насыщенного водяного пара и, при неизменной или уменьшающейся относительной влажности воздуха, усиливает дефицит давления водяного пара. Это повышает способность атмосферы поглощать влагу с водной поверхности,

почвы и растительного покрова. Вместе с радиационным балансом и скоростью ветра данный процесс определяет аэродинамическую и энергетическую составляющие испарения. Поэтому пространственное распределение испарения отражает комплексное взаимодействие температурных, влажностных, радиационных и орографических факторов [10].

В климатологических и водобалансовых исследованиях необходимо различать фактическое испарение и потенциальную эвапотранспирацию. Испарение с водной поверхности характеризует потери воды непосредственно с открытых водоемов, тогда как потенциальная эвапотранспирация отражает максимально возможный расход влаги при отсутствии ее дефицита и используется как показатель климатического испарительного спроса. Для оценки условий засушливости особенно важно сопоставление потенциальной эвапотранспирации с количеством атмосферных осадков. Такое соотношение позволяет выделять гумидные, субгумидные, семиаридные, аридные и гипераридные условия и оценивать степень потенциального дефицита влаги [11].

Объектом исследования является территория Шу-Таласского водохозяйственного бассейна. В работе применены данные метеорологических станций (таблица 1). Предметом исследования являются пространственные закономерности распределения потенциального испарения и условий засушливости, формирующиеся под влиянием температуры воздуха, атмосферных осадков, влажности, ветрового и радиационного режима, а также высоты местности.

Таблица 1 – Сведение об основных метеорологических станциях Шу-Таласского бассейна

Table 1 – Information on the main meteorological stations of the Shu-Talas basin

Станция	Широта	Долгота	Высота, м
Тасты	44°47'60"	69°09'33"	192
Кордай	43°19'17.08"	74°55'48.05"	1141
Уюк	43°46'38.23"	70°57'01.95"	373
Саудакент	43°44'41.25"	69°55'54.85"	337
Толе би	43°41'45.00"	73°44'51.45"	455
Кулан	42°55'09.61"	72°43'50.42	682
Шолаккорган	43°45'15"	69°10'15"	480
Мойынкум	44°16'29.29"	72°56'50.93"	351
Жамбыл	42°52'03.57"	71°17'36.75"	651
Шокпар	43°49'02.01"	74°22'16.47"	769
Хантау	44°13'44.06"	73°48'26.43"	552
Талас	42.51'67"	72.21'67"	1217
Кызыл Адыр	42.65'00"	71.63'00"	924
Бишкек	42.85'00"	74.53'31"	756
Тео Ашуу	42.50'00"	74.00'00"	2000
Ит-Агар	42.17'00"	72.90'00"	2011
Яны Жер	43.00'00"	74.00'00"	750
Токмок	42.83'31"	75.28'31"	816
Байтик	42.65'00"	74.50'00"	1580
Иссык Ата	42.85'00"	74.87'00"	627
Кара Балта	42.80'00"	73.82'00"	771

Цель исследования – оценить современное пространственное распределение испарения и условий засушливости Шу-Таласского бассейна и определить влияние изменения климата на условия влагообеспеченности.

Задачи исследования – проанализировать климатические и физико-географические факторы, определяющие пространственное распределение испарения в Шу-Таласском бассейне; рассчитать средние многолетние значения потенциальной эвапотранспирации и выполнить их пространственное картографирование; оценить условия засушливости на основе соотношения атмосферных

осадков и потенциальной эвапотранспирации; выявить территориальные закономерности изменения испарения и индекса аридности; определить зоны наиболее высокого климатического дефицита влаги и оценить их уязвимость в условиях современного потепления; обосновать значение выявленных пространственных закономерностей для оценки влагообеспеченности и водохозяйственного планирования.

Материалы и методы исследования. В качестве исходной информации использованы материалы многолетних наблюдений государственной гидрометеорологической сети РГП «Казгидромет» по Казахстану [12], данные международных климатических архивов NASA POWER по относительной влажности и скорости ветра для станций Кыргызстана [13].

Для анализа современных климатических условий использованы наблюдения за 1981-2024 гг. В качестве климатической нормы принят период 1991–2020 гг., соответствующий рекомендациям Всемирной метеорологической организации. Для оценки пространственного распределения испарения при помощи метода Пенмана–Монтейта использовались среднемноголетние значения следующих метеорологических элементов: максимальная температура воздуха; минимальная температура воздуха; относительная влажность воздуха; скорость ветра на высоте 2 м; солнечная радиация. Для расчета индекса аридности (Aridity Index, AI) территории применялись суммы атмосферных осадков.

Метод Пенмана–Монтейта [14], рекомендованный Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН в качестве эталонного подхода к расчету референсной эвапотранспирации, объединяет энергетическую и аэродинамическую составляющие процесса и рассчитан в статье при помощи программы CROPWAT8.0 [15].

Уравнения Пенмана–Монтейта представляет собой следующую формулу:

$$\mathrm{ET}_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 \cdot u_2)}, \quad (1)$$

где ET_0 – эталонная эвапотранспирация, мм/сут; R_n – чистая радиация на поверхности растений, МДж м^2/сут.; G – плотность теплового потока почвы, МДж м^2 /сут.; T – среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м, °C; U_2 – скорость ветра на высоте 2 м, м/с; e_s – давление пара насыщения, кПа; e_a – фактическое давление, кПа; (e_s – e_a) – дефицит давления пара насыщения, кПа; Δ – градиент кривой давления пара, кПа/°C); γ – психрометрическая постоянная, кПа/°C.

Оценка современных условий засушливости выполнена с использованием индекса аридности (Aridity Index, AI) [11], характеризующего соотношение между атмосферным увлажнением и потенциальной эвапотранспирацией. Индекс рассчитывался как отношение годовой суммы атмосферных осадков к годовой потенциальной эвапотранспирации:

$$\mathrm{A}_i = \frac{P}{\mathrm{PET}}, \quad (2)$$

где *P* – годовая сумма атмосферных осадков, мм; PET – потенциальная эвапотранспирация, мм.

Полученные значения индекса использовались для выделения территорий с различной степенью климатической засушливости. Согласно международной классификации UNEP [16] выделяются следующие категории, представленные в таблице 2.

Для пространственной оценки засушливости целесообразно использовать индекс аридности, основанный на соотношении атмосферных осадков и потенциальной эвапотранспирации. Его преимущество заключается в физически содержательной интерпретации: снижение индекса свидетельствует о возрастании климатического дефицита влаги, а повышение – об улучшении условий увлажнения. Использование индекса аридности позволяет интегрально учитывать одновременно приходную и расходную части водного баланса территории.

При картографировании индекса аридности совместно с полями испарения, осадков и рельефа становится возможным выявить зоны наиболее высокого испарительного спроса, участки потенциального дефицита воды и территории, где орографическое увеличение осадков частично компенсирует потери влаги.

Несмотря на значимость Шу-Таласского бассейна для водного и сельскохозяйственного комплекса Казахстана, пространственные особенности испарения и засушливости его территории изучены недостаточно полно. Большинство исследований сосредоточено на изменениях темпера-

Таблица 2 – Международная классификация Программы ООН
по окружающей среде со степенью различной климатической засушливости [16]

Table 2 – International classification of the United Nations Environment Programme
with the degree of different climatic aridity [16]

Категория условий увлажнения	Диапазон индекса аридности (AI)	Краткая характеристика
Гипераридные районы	AI < 0,05	Крайне засушливые территории с практически полным отсутствием естественного увлажнения
Аридные районы	0,05 ≤ AI < 0,20	Очень засушливые территории с высоким дефицитом влаги и ограниченными водными ресурсами
Семиаридные районы	0,20 ≤ AI < 0,50	Засушливые территории с недостаточным увлажнением и выраженной зависимостью от межгодовой изменчивости осадков
Сухие субвлажные районы	0,50 ≤ AI < 0,65	Территории с умеренным дефицитом влаги, переходные от засушливых к гумидным условиям
Влажнные районы	AI ≥ 0,65	Территории с достаточным атмосферным увлажнением, где количество осадков превышает потенциальные потери влаги на испарение

туры, осадков, снежного покрова и речного стока, тогда как совместная интерпретация потенциального испарения и атмосферного увлажнения в единой картографической системе представлена ограниченно, поэтому недостаточно изученным остается вопрос о том, в какой степени высотная поясность и современное потепление определяют пространственный контраст между зонами формирования водных ресурсов и зонами их наиболее интенсивного расходования влаги.

Далее был рассчитан климатический дефицит влаги [17], определяемый как разность между потенциальной эвапотранспирацией и атмосферными осадками:

$$D = PET - P, \quad (3)$$

где D – климатический дефицит влаги, мм; PET – потенциальная эвапотранспирация, мм; P – сумма атмосферных осадков, мм.

Наиболее неблагоприятные условия формируются там, где одновременно наблюдаются высокая PET и низкий AI. Низкое значение AI указывает на недостаточное поступление атмосферных осадков относительно испарительного спроса, а высокая PET характеризует значительную потенциальную потерю влаги.

Также установлено фактическое испарение (Ea), которое имеет особое значение для Шу-Таласского бассейна вследствие преимущественно аридных и семиаридных условий и ограниченности водных ресурсов. В отличие от потенциальной эвапотранспирации, характеризующей испарительную потребность атмосферы, фактическое испарение отражает реальные потери влаги с учетом её доступности. Анализ позволяет оценить степень реализации потенциального испарения, выявить территории с наиболее выраженным водным дефицитом и более объективно характеризовать расходную составляющую климатического водного баланса. В условиях современного потепления оценка Ea особенно важна для анализа изменения водообеспеченности и устойчивости водных ресурсов Шу-Таласского бассейна.

Фактическое испарение (Ea) рассчитывалось на основе уравнения М. И. Будыко, описывающего долгосрочный баланс между обеспеченностью территории влагой и энергетическими ресурсами атмосферы. В рамках подхода М. И. Будыко величина фактического испарения определяется соотношением атмосферных осадков (P) и потенциальной эвапотранспирации (ET_0). Основным параметром является индекс сухости:

$$\varphi = \frac{ET_0}{P},$$

где φ – индекс сухости Будыко; ET_0 – потенциальная эвапотранспирация, мм/год; P – сумма атмосферных осадков, мм/год.

В засушливых условиях при φ>1 испарение преимущественно ограничивается доступностью влаги, тогда как во влажных условиях его величина в большей степени ограничивается энергетическими ресурсами атмосферы.

Для определения фактического испарения использовалась классическая безпараметрическая зависимость М. И. Будыко [18]:

$$\frac{E_a}{P} = \left[\varphi tanh\left(\frac{1}{\varphi}\right) \cdot (1 - e^{-\varphi})\right]\frac{1}{2}.$$

Она учитывает одновременно водное ограничение, задаваемое количеством атмосферных осадков, и энергетическое ограничение, характеризуемое потенциальной эвапотранспирацией. Классическая формула М. И. Будыко относится к безпараметрическим зависимостям долгосрочного водно-энергетического баланса.

Актуальность исследования заключается в необходимости количественно и картографически оценить современное соотношение прихода и климатически обусловленного расхода влаги в Шу-Таласском бассейне. Решение данной задачи позволит перейти от описания отдельных метеорологических показателей к интегральной оценке влагообеспеченности.

В основу исследования положена следующая причинно-следственная схема: современное потепление изменяет термические и аэродинамические условия испарения; рост потенциального испарения при ограниченном или сокращающемся количестве осадков усиливает аридность; пространственное сочетание этих процессов формирует зоны различной влагообеспеченности и определяет климатические риски для водных ресурсов.

Практическая значимость исследования пространственной оценки испарения и аридности обусловлена возможностью ее использования при разработке современных водохозяйственных балансов, оценке потерь воды с водных объектов, планировании орошения, районировании сельскохозяйственных земель, анализе риска засух и обосновании адаптационных мероприятий. Для трансграничного Шу-Таласского бассейна такие результаты могут быть особенно востребованы при согласовании режимов водопользования, оценке потребности в воде в вегетационный период и выделении территорий, наиболее чувствительных к дальнейшему потеплению.

Таким образом, исследование современного пространственного распределения испарения и условий засушливости является необходимым этапом комплексной оценки климатических ресурсов Шу-Таласского бассейна. Совместный анализ температуры воздуха, атмосферных осадков, потенциальной эвапотранспирации, индекса аридности и рельефа позволяет раскрыть механизмы формирования территориальной неоднородности влагообеспеченности и определить наиболее уязвимые зоны бассейна в условиях изменения климата.

Результаты. Температура воздуха является одним из основных факторов, определяющих энергетические возможности испарения. При ее повышении возрастает дефицит насыщения водяного пара, увеличивается количество энергии, расходуемой на фазовый переход воды, и, следовательно, усиливается потенциальное испарение. Поэтому наиболее высокие величины испарения следует ожидать в теплых равнинных и низкогорных частях бассейна, представленных станциями Каратау, Хантау, Кара-Балта, Бишкек, Токмок, Тараз и Саудакент, где средняя многолетняя температура 11,0-12,0 °С, а максимальные средние значения достигают 12,1 - 14,0°С. Напротив, в высокогорной части бассейна, особенно в районе Тео-Ашуу, Ит-Агара и Байтика, пониженный температурный фон ограничивает интенсивность испарения даже при достаточном количестве атмосферной влаги.

Представленные в таблице 3 данные свидетельствуют о значительной пространственной неоднородности температурно-влажностных условий Шу-Таласского бассейна. Средняя многолетняя температура воздуха на рассматриваемых метеорологических станциях изменяется от –2,6°С на высокогорной станции Тео-Ашуу до 12,0°С на станциях Каратау и Хантау. В большинстве равнинных и предгорных районов средняя температура составляет около 10-12 °С, тогда как на станциях Байтик и Ит-Агар она снижается соответственно до 6,8 и 4,3°С. Такая дифференциация отражает влияние абсолютной высоты и орографического строения бассейна.

Стандартное отклонение температуры на большинстве станций составляет 0,6-1,1 °С, а коэффициент вариации преимущественно не превышает 5-10 %, что указывает на сравнительно устойчивый температурный режим. Наибольшая относительная изменчивость отмечается на станции Ит-Агар – 24,2 %, что может быть связано с высокогорным положением и значительной межгодовой изменчивостью термических условий. Вместе с тем для оценки испарения важен не

Таблица 3 – Статистические характеристики температуры воздуха, рассчитанные относительно 1991-2020 гг.

Table 3 – Statistical characteristics of air temperature calculated relative to 1991-2020

МС	$\overline{T}$	$\overline{T}_{max}$	$\overline{T}_{min}$	σ	C_v
Уланбель	10,3	11,8	8,2	1	9,2
Тасты	10,6	12	8,6	1,1	9,9
Шолаккорган	10,8	12,4	8,7	0,9	8,1
Саудакент	11	12,1	9	0,8	7,5
Уюк	10,9	12,2	9	0,9	8,1
Кулан	10,5	11,5	8,5	0,7	6,9
Мерке	10,8	11,9	9	0,7	6,5
Толе би	10,6	11,8	8,7	0,9	8,2
Шокпар	11	11,9	9,2	0,7	6,4
Кордай	8,9	9,8	7,2	0,7	7,6
Хантау	12	12,9	10,8	0,6	5,3
Мойынкум	10,4	11,6	8,9	0,8	7,8
Тараз	11,2	12,2	9,3	0,7	6,6
Бишкек	11,6	12,9	9,9	0,7	6,2
Байтик	6,8	7,6	5,6	0,5	7,4
Иссык-Ата	10,6	11,9	9,3	0,6	5,9
Ит-Агар	4,3	5,5	1,8	1,0	24,2
Кызыл Адыр	9,1	10,6	7,6	0,8	8,7
Талас	8,9	10,1	7,4	0,6	7,2
Тео-Ашуу	-2,6	-0,9	-3,9	0,8	-29,2
Токмок	11,4	12,5	10,2	0,6	5,1
Яны Жер	11,4	14	9	1,3	11,7
Кара-Балта	11,9	14	10,2	1,0	8,1

Примечания: $\overline{T}$ – средняя температура воздуха, $\overline{T}_{max}$ – средняя максимальная температура воздуха, $\overline{T}_{min}$ – средняя минимальная температура воздуха, σ – стандартное отклонение, C_v – коэффициент вариации.

только средний температурный фон, но и повторяемость особенно теплых лет, поскольку именно в такие годы потенциальное испарение и дефицит влаги возрастают наиболее существенно.

Известно, что влияние осадков на испарение имеет двойственный характер, с одной стороны, увеличение осадков повышает запасы влаги в почве и водоемах, а также в растительном покрове, то есть обеспечивает фактическое испарение необходимым водным ресурсом. Поэтому при достаточном обеспечении влагой некоторые территории могут испарять значительные объемы суммарного испарения. С другой стороны, повышенное количество осадков обычно сопровождается большей облачностью, более высокой относительной влажностью воздуха и снижением дефицита насыщения, что ограничивает потенциальную скорость испарения. Следовательно, атмосферные осадки определяют преимущественно доступность влаги, тогда как температура – потенциальную интенсивность ее расходования [19].

Далее рассмотрены условия атмосферных осадков. В таблице 3 представлены статистические характеристики атмосферных осадков, рассчитанные относительно 1991-2020 гг.

Наиболее неблагоприятное сочетание для влагообеспеченности формируется в теплых и маловодных районах. Например, в Хантау средняя температура достигает 12,0 °С, тогда как среднемноголетнее количество осадков составляет только 200,9 мм. В Саудакенте средняя температура равна 11,0 °С, а осадки составляют 217,3 мм. Высокий термический фон в сочетании с малым количеством осадков способствует увеличению потенциального испарения, быстрому иссушению почвы и формированию выраженного дефицита атмосферного увлажнения.

Минимальное среднемноголетнее количество осадков наблюдается на станциях Уланбель – 150,0 мм, Тасты – 156,9 мм, Уюк – 162,8 мм и Шолаккорган – 183,2 мм (таблица 4). К относительно сухим также относятся Мойынкум, Каратау и Хантау, где годовые суммы составляют приблизительно 193-201 мм. Эти станции характеризуют преимущественно равнинные и пустынно-полупустынные территории бассейна.

Таблица 4 – Статистические характеристики атмосферных осадков, рассчитанные относительно 1991-2020 гг.

Table 4 – Statistical characteristics of atmospheric precipitation calculated for 1991-2020

МС	$\bar{R}$	$\bar{R}_{max}$	$\bar{R}_{min}$	σ	C_v
Уланбель	150	261,5	74	48,1	32
Тасты	156,9	284,9	90,2	50,4	32,1
Шолаккорган	183,2	340,6	98,6	53,1	29
Саудакент	217,3	342	108,1	63,7	29,3
Уюк	162,8	324,9	84,4	53,1	32,6
Кулан	338,3	512,9	151,7	84,8	25,1
Мерке	412,3	646,8	209,8	103,2	25
Толе би	309,1	470,9	151,5	78,8	25,5
Шокпар	345,7	511	192,9	83,4	24,1
Кордай	469,2	747,6	303,9	121,9	26
Хантау	200,9	317,1	57,2	80,1	39,9
Мойынкум	193,5	310,7	95,6	59,9	31
Тараз	356,7	568,9	225,8	86,6	24,3
Бишкек	454,6	742,0	294,0	103,2	22,7
Байтик	387,7	574	217,5	82,6	21,3
Иссык-Ата	398,6	556,8	283,1	76	19,1
Ит-Агар	442,1	1484	164,9	240	54,3
Кызыл Адыр	356,9	575	210,2	89,7	25,1
Талас	313,2	510	152	89,4	28,5
Тео-Ашуу	463,5	848,7	175,7	193	41,6
Токмок	513,4	1168	289	204,3	39,8
Яны Жер	407,6	1408	190,4	216,8	53,2
Кара-Балта	378,2	819	190,4	151,9	40,2

Примечания: $\bar{R}$ – среднее количество осадков, $\bar{R}_{max}$ – среднее максимальное количество осадков, $\bar{R}_{min}$ – среднее минимальное количество осадков, σ – стандартное отклонение, C_v – коэффициент вариации.

Более высокое увлажнение характерно для предгорных и горных районов. Среднегодовое количество осадков достигает 412,3 мм в Мерке, 454,6 мм в Бишкеке, 469,2 мм в Кордае, 463,5 мм на Тео-Ашуу и 513,4 мм в Токмоке.

Таким образом, различия между наиболее сухими и наиболее увлажненными пунктами превышают трехкратную величину. Это подтверждает отчетливое увеличение осадков по мере перехода от равнинных пустынных территорий к предгорьям и горным склонам.

Особенно засушливые условия складываются также на станциях Уланбель, Тасты, Уюк и Мойынкум, здесь годовые суммы осадков составляют около 150-194 мм, а средняя температура колеблется от 10,3 до 10,9 °С. При таком сочетании поступление воды с осадками существенно уступает возможным потерям на испарение. В результате фактическое испарение может ограничиваться недостатком доступной влаги.

В предгорной зоне складываются более благоприятные сочетания температуры и осадков. К примеру на станциях Мерке, Кордай, Бишкек, Иссык-Ата и Кара-Балта среднемноголетнее

количество осадков изменяется приблизительно от 378 до 469 мм, при средней температуре около 8,9-11,9 °С. Здесь атмосферное увлажнение лучше компенсирует потери воды на испарение. Однако на наиболее теплых станциях, например в Бишкеке и Кара-Балте, даже сравнительно высокие суммы осадков могут сопровождаться значительными испарительными потерями вследствие повышенного температурного фона.

В высокогорных районах осадки выпадают достаточно больше, а температура существенно ниже, что способствует меньшему количеству испарения. К примеру на станции Тео-Ашуу при среднемноголетней температуре –2,6 °С выпадает в среднем 463,5 мм осадков, а на станции Ит-Агар средняя температура составляет 4,3 °С, а осадки – 442,1 мм. Такое сочетание приводит к снижению потенциального испарения и накоплению части атмосферной влаги в виде снега. Поэтому горная часть бассейна выполняет водорегулирующую функцию: осадки здесь не сразу расходуются на испарение, а временно накапливаются и затем участвуют в формировании сезонного стока [20].

Далее рассчитано среднее многолетнее значение потенциальной эвапотранспирации в Шу-Таласском бассейне (рисунке 1), на котором представлена карта пространственного распределения среднемноголетней потенциальной эвапотранспирации за 1991-2020 гг.

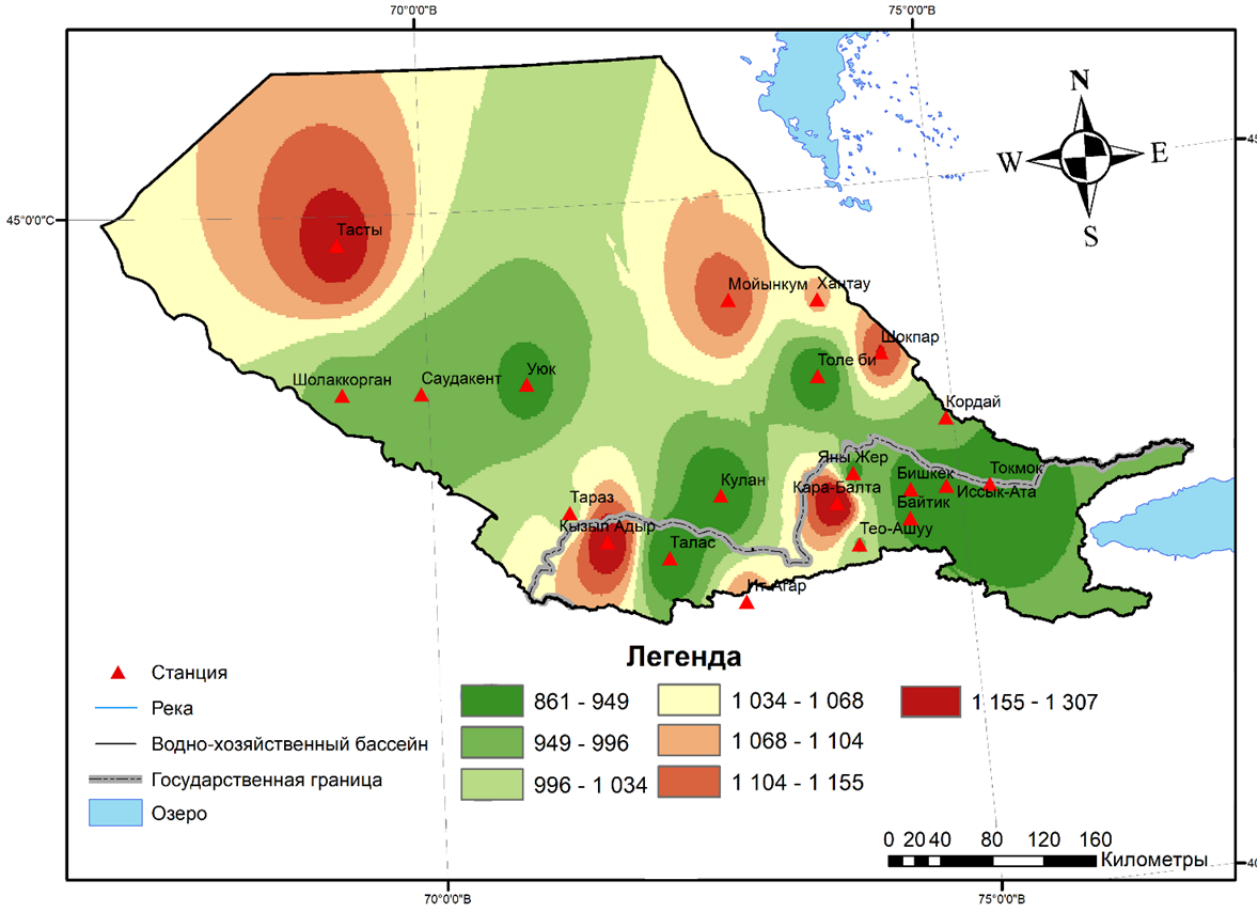


Рисунок 1 – Пространственное распределение средней многолетней потенциальной эвапотранспирации по станциям Шу-Таласского бассейна, рассчитанное за 1991-2020 гг., мм/год

Figure 1 – Spatial distribution of mean annual Potential Evapotranspiration at stations in the Shu-Talas basin for the 1991-2020 period, mm/year

Пространственное распределение средней многолетней потенциальной эвапотранспирации (ET_0) за 1991-2020 гг. по территории Шу-Таласского бассейна характеризуется значительной неоднородностью: значения изменяются примерно от 861 до 1307 мм/год. Наиболее высокая ET_0 отмечается в западной и северо-западной части бассейна, особенно в районе станции Тасты, где формируется выраженный локальный максимум 1155–1307 мм/год. Повышенная испарительная

способность здесь обусловлена засушливостью и континентальностью климата, высокой инсоляцией и низкой влажностью воздуха. Дополнительное влияние оказывает орография: западные равнинные территории в меньшей степени защищены от адвекции сухих воздушных масс, а хребет Каратау создает эффект орографической тени, способствующий уменьшению увлажнения прилегающих территорий. Для Шу-Таласского бассейна действительно отмечается положение в дождевой тени Каратау и сравнительно небольшое количество осадков.

В центральной части бассейна пространственное распределение становится более контрастным. В районах Кулана, Таласа и Уюка преобладают пониженные значения ET_0 – преимущественно 861-996 мм/год, тогда как в районах Кызыл-Адыра, Мойынкума–Хантау формируются локальные зоны ее повышения до 1104-1155 мм/год и более. Такая неоднородность связана с чередованием равнинных, предгорных и межгорных территорий. В более открытых и засушливых участках усиление прогрева и ветрового обмена повышает аэродинамическую составляющую испарения, тогда как в предгорьях снижение температуры и изменение условий увлажнения ограничивают ET_0. Это согласуется с физической основой метода Penman–Monteith, в котором величина ET_0 определяется совместным воздействием радиации, температуры, влажности и скорости ветра [21].

В восточной и юго-восточной частях бассейна, в районах Толе би, Кордая, Бишкека, Токмока и Иссык-Аты, в основном формируется зона пониженной ET_0 – 861-996 мм/год, что связано с влиянием предгорий Кыргызского Ала-Тоо и высотной поясности: с увеличением высоты снижается температура воздуха и соответственно потенциальная испарительная способность атмосферы. Однако на этом фоне выделяется локальный максимум в районе Кара-Балты (до 1155-1307 мм/год). Его формирование может быть связано с местной циркуляцией в Шуйской долине: горно-долинный воздухообмен и канализирование воздушных потоков рельефом способны усиливать скорость ветра и турбулентный перенос водяного пара, увеличивая ET_0.

Таким образом, распределение ET_0 в Шу-Таласском бассейне определяется не только широтным положением и температурой, но и сложным взаимодействием орографии и местной атмосферной циркуляции. Равнинные засушливые и хорошо прогреваемые территории преимущественно характеризуются повышенной потенциальной эвапотранспирацией, тогда как в предгорных и более прохладных районах она снижается; локальные отклонения от этой закономерности обусловлены особенностями рельефа, экспозиции и горно-долинной циркуляции [8].

Далее нами была построена карта пространственного распределения индекса аридности (AI), рассчитанного за 1991-2020 гг. Она отражает выраженную неоднородность условий атмосферного увлажнения в Шу-Таласском бассейне (рисунок 2). Полученные значения изменяются от 0,13 до 0,58, что свидетельствует о преобладании аридных и семиаридных природно-климатических условий практически на всей исследуемой территории.

Согласно рисунку 2 пространственное распределение индекса аридности (AI) за 1991-2020 гг. в Шу-Таласском бассейне изменяется от 0,13 до 0,58, отражая выраженный градиент увеличения увлажнённости от западных и северо-западных равнин к южным и юго-восточным предгорным районам. Наиболее засушливые условия (AI = 0,13-0,21) характерны для западной части бассейна, особенно районов Тасты и Шолаккоргана, где малое количество осадков в сочетании с повышенной ET_0 формирует устойчивый дефицит влаги и аридные условия.

В центральной части бассейна AI преимущественно возрастает до 0,21-0,39, что соответствует переходу к семиаридным условиям. При этом в районах Мойынкума и Хантау сохраняются локальные очаги повышенной засушливости, обусловленные недостаточным атмосферным увлажнением и относительно высокой испарительной потребностью атмосферы.

Наиболее благоприятное соотношение осадков и ET_0 наблюдается в южной и юго-восточной частях бассейна, где AI увеличивается до 0,39-0,58. Максимальные значения приурочены к району Токмока–Иссык-Аты, где отдельные территории переходят от семиаридных к сухим субгумидным условиям (AI > 0,50). Повышение AI в этом направлении связано с влиянием орографии Северного Тянь-Шаня: усилением атмосферного увлажнения в предгорьях и снижением ET_0 вследствие более низких температур.

Таким образом, распределение AI подтверждает общую закономерность: наиболее аридными являются западные равнинные территории бассейна, тогда как условия увлажнения улучшаются к предгорным районам юга и юго-востока. Это распределение согласуется с распределением кли-

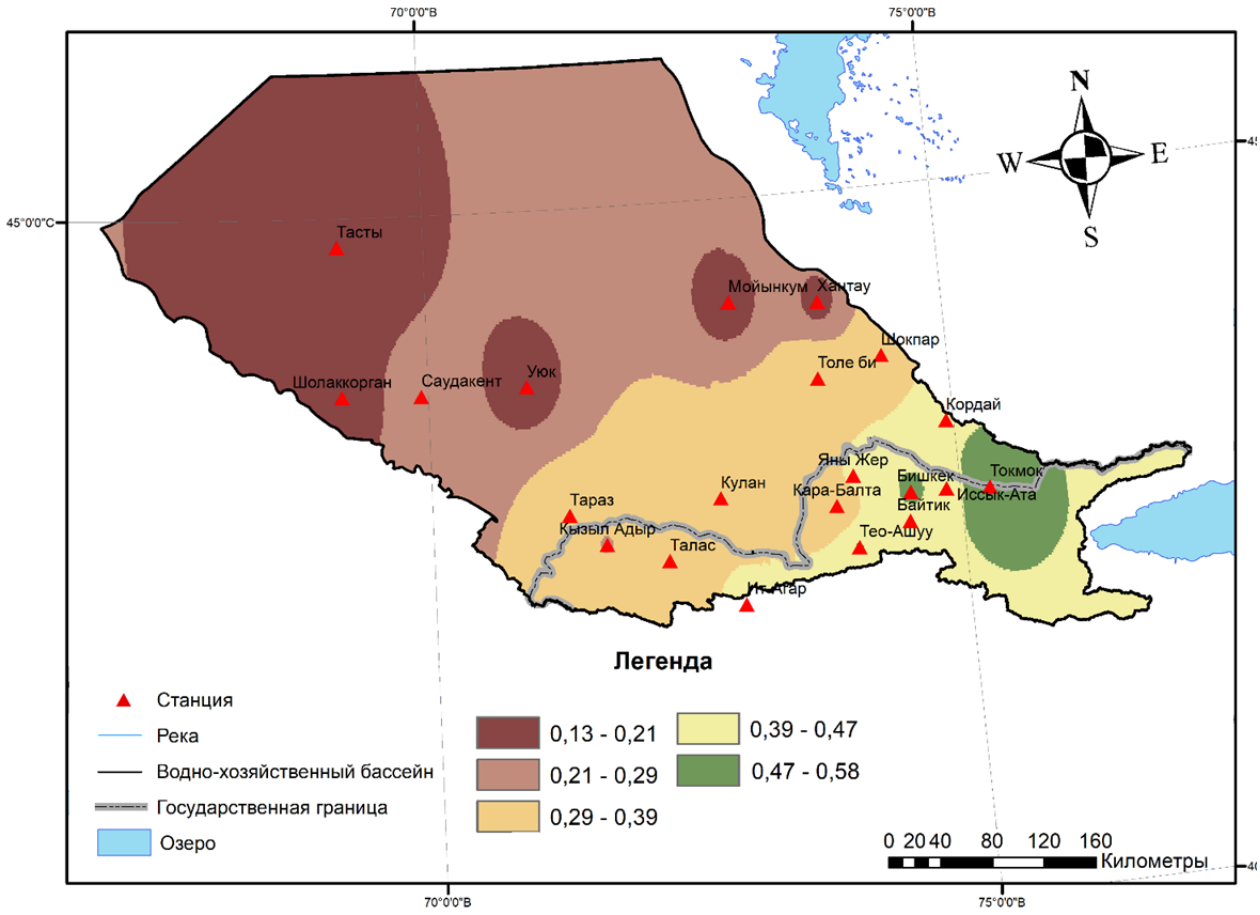


Рисунок 2 – Пространственное распределение условии засушливости (AI)
по станциям Шу-Таласского бассейна, рассчитанное за 1991-2020 гг.

Figure 2 – Spatial distribution of aridity conditions (AI) at stations
in the Shu-Talas basin calculated for the period 1991-2020

матического дефицита влаги, максимального на западе и уменьшающегося в направлении предгорных и горных территорий.

Далее был рассчитан климатический дефицит влаги (рисунок 3), который варьируется по станциям Шу-Таласского бассейна от 363 до 1039 мм/год. Такой широкий диапазон свидетельствует о выраженной пространственной неоднородности влагообеспеченности территории и значительном превышении потенциальных потерь влаги над ее поступлением с осадками.

Согласно рисунку 3 климатический дефицит влаги в Шу-Таласском бассейне за 1991-2020 гг. характеризуется значительной пространственной неоднородностью и изменяется от 363 до 1039 мм/год. Наиболее высокий дефицит (890-1039 мм/год) отмечается прежде всего в западной и северо-западной частях бассейна, с наиболее выраженным максимумом в районе станции Тасты. Локальные очаги высокого дефицита также выделяются в районах Мойынкума, Хантау, Кызыл-Адыра и Кара-Балты. Формирование повышенного дефицита здесь обусловлено сочетанием недостаточного атмосферного увлажнения с относительно высокой испарительной потребностью атмосферы.

Значительная часть западных и центральных равнинных территорий относится к диапазонам 697-800 и 800-890 мм/год. В эту зону входят районы Шолаккоргана, Саудакента, Уюка и Жамбыла. Сохранение повышенного дефицита влаги связано с высокой континентальностью и засушливостью климата: сравнительно небольшое количество осадков не компенсирует потенциальные потери влаги на эвапотранспирацию. Поэтому западная и центральная равнинные части бассейна характеризуются устойчивым напряжением климатического водного баланса.

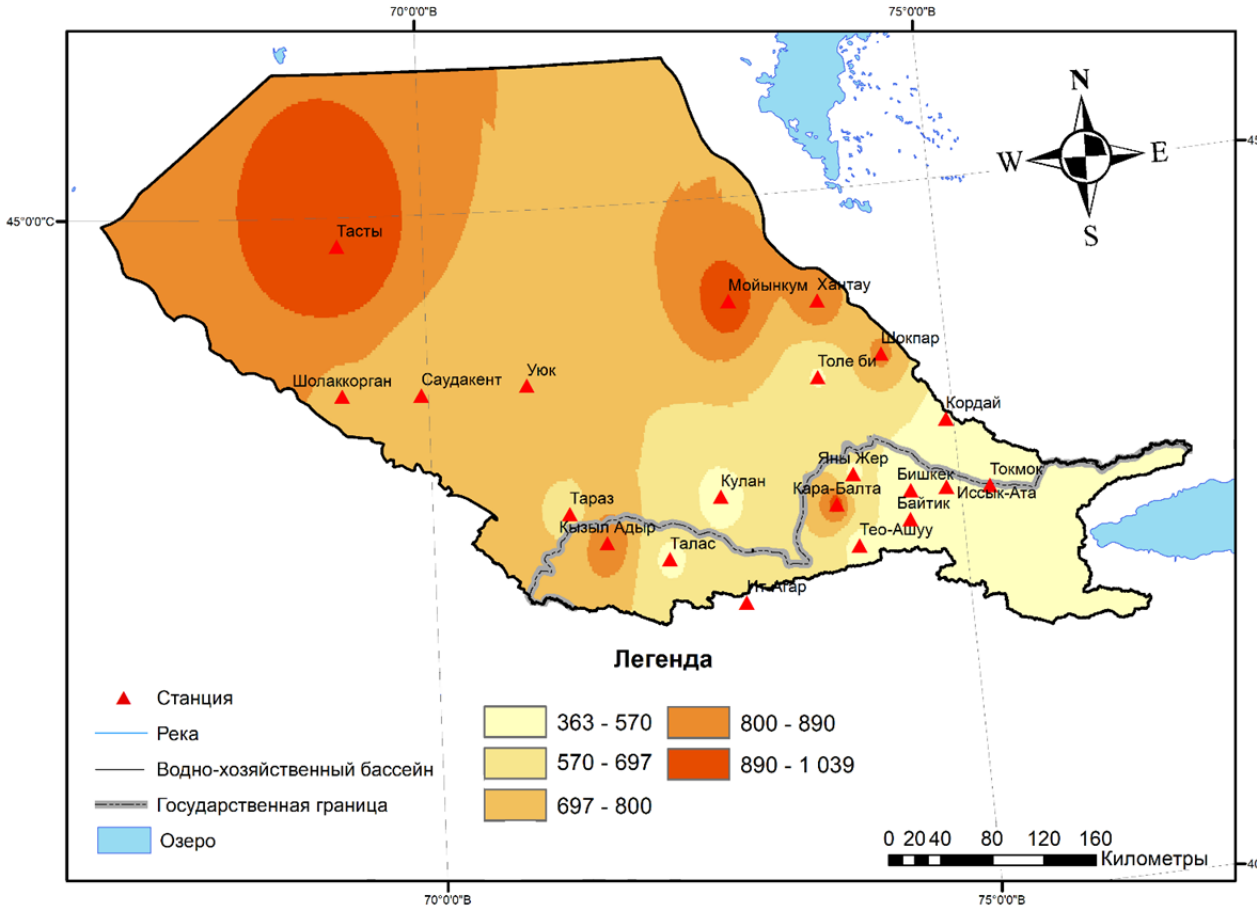


Рисунок 3 – Пространственное распределение климатического дефицита влаги в Шу-Таласском бассейне за 1991-2020 гг., мм/год

Figure 3 – Spatial distribution of climatic moisture deficit in the Shu-Talas basin for the period 1991-2020, mm/year

В центральной и восточной частях пространственное распределение становится более мозаичным. На общем фоне относительно меньшего дефицита выделяются локальные максимумы в районах Мойынкума–Хантау и Кара-Балты, что согласуется с локальным повышением ET_0 на этих территориях. Это показывает, что формирование климатического дефицита определяется не только количеством атмосферных осадков, но и пространственными различиями испарительной способности атмосферы, связанными с температурой, влажностью воздуха, ветровым режимом и местными орографическими условиями. Наименьшие значения климатического дефицита, преимущественно 363-570 мм/год, характерны для южных и юго-восточных предгорных и горных районов бассейна, включая территории вблизи Кулана, Бишкека, Токмока, Иссык-Аты и Тео-Ашуу. В отличие от предыдущих расчётов Шуская долина уже не выделяется как основная зона максимального климатического дефицита. Его уменьшение в юго-восточной части бассейна связано с более низкими значениями ET_0 и улучшением условий атмосферного увлажнения, а в высокогорных районах дополнительно проявляется влияние высотной поясности, ограничивающей испарительную потребность атмосферы.

Таким образом, по обновлённым расчётам основной пространственный градиент климатического дефицита направлен от наиболее влагодефицитных западных и северо-западных равнинных территорий к менее дефицитным южным и юго-восточным предгорным и горным районам. Наиболее уязвимыми являются территории с дефицитом 890-1039 мм/год, где сочетание недостаточного увлажнения и повышенной ET_0 создаёт предпосылки для усиления почвенной засухи и увеличения потребности в оросительной воде при дальнейшем потеплении климата.

На рисунке 4 представлено пространственное распределение фактического испарения в Шу-Таласском бассейне за 1991-2020 гг.

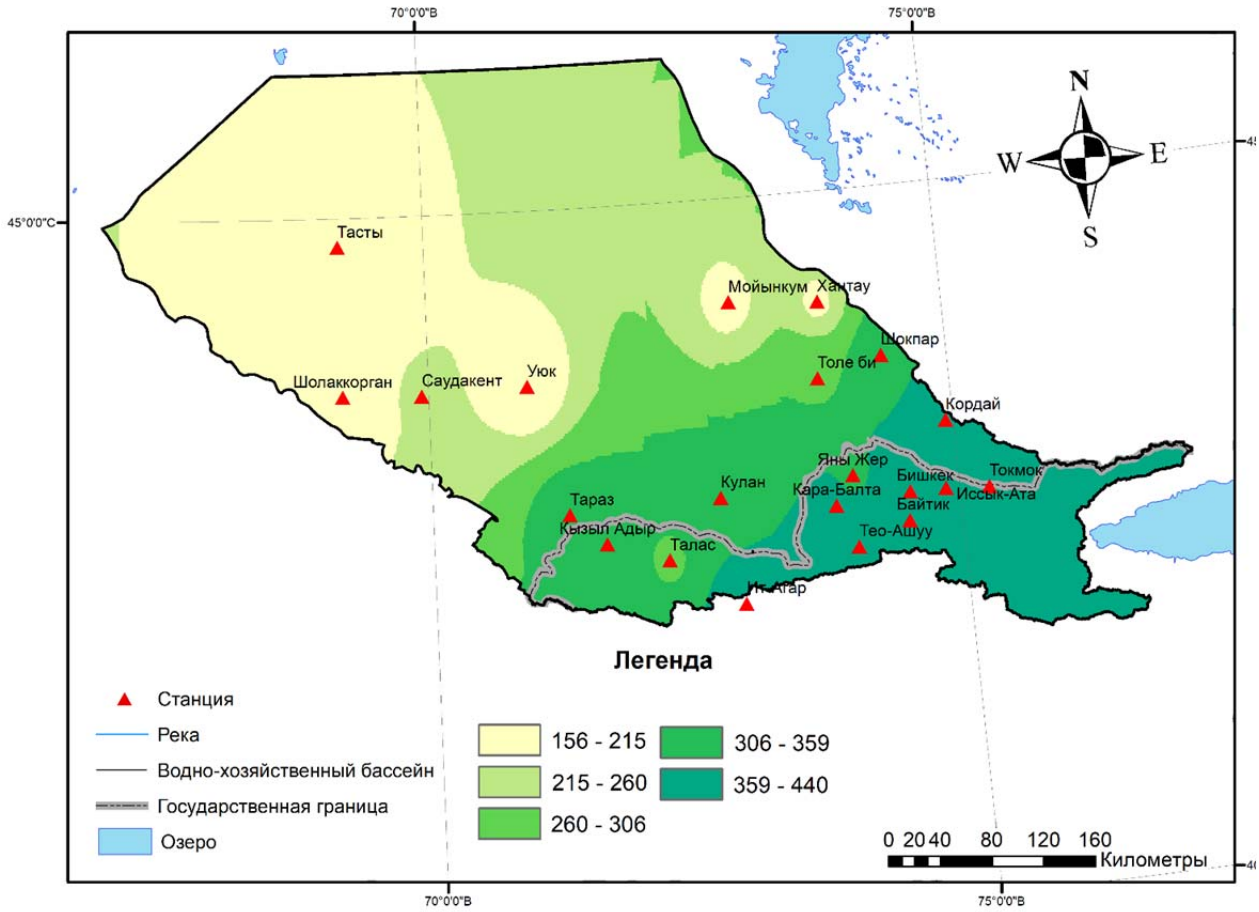


Рисунок 4 – Пространственное распределение фактического испарения (Ea)
в Шу-Таласском бассейне за 1991-2020 гг., мм/год

Figure 4 – Spatial distribution of actual evaporation in the Shu-Talas basin for the period 1991-2020, mm/year

Согласно рисунку 4 пространственное распределение фактического испарения (Ea) за 1991-2020 гг. изменяется от 156 до 440 мм/год и характеризуется выраженным увеличением от западных и северо-западных равнин к южным и юго-восточным предгорным районам. Минимальные значения (156-215 мм/год) характерны для наиболее засушливой западной части бассейна, включая район станции Тасты, где фактическое испарение ограничивается прежде всего небольшим количеством атмосферных осадков. Поэтому, несмотря на высокую потенциальную испарительную способность атмосферы, недостаток доступной влаги не позволяет реализоваться потенциально возможному испарению.

В центральной части бассейна Ea постепенно возрастает преимущественно до 215-306 мм/год. При этом локальные пониженные значения сохраняются в районах Уюка, Мойынкума и Хантау, что связано с недостаточным атмосферным увлажнением. Южнее, в районах Жамбыла, Кызыл-Адыра, Таласа и Кулана, фактическое испарение увеличивается до 306-359 мм/год, отражая улучшение влагообеспеченности территории.

Максимальные значения Ea (359-440 мм/год) формируются преимущественно в южной и юго-восточной частях бассейна, включая районы Кара-Балты, Бишкека, Токмока, Иссык-Аты и Тео-Ашуу. Рост фактического испарения здесь связан с увеличением атмосферных осадков под влиянием орографии Северного Тянь-Шаня и соответственно большей доступностью влаги для испарения и транспирации.

Таким образом, распределение Ea имеет закономерность, обратную пространственному распределению климатического дефицита влаги: в наиболее аридных западных районах при высокой ET_0 фактическое испарение ограничивается дефицитом осадков, тогда как в более увлажнённых южных и юго-восточных предгорьях увеличение доступной влаги обеспечивает рост Ea.

Такая закономерность соответствует концепции М. И. Будыко, согласно которой в аридных условиях фактическая эвапотранспирация преимущественно ограничивается доступностью воды.

Обсуждение. Для части метеорологических станций Кыргызстана отсутствие полного ряда наземных наблюдений за отдельными параметрами обусловило необходимость использования данных NASA POWER. В частности, данные POWER применялись для максимальной и минимальной температуры воздуха, относительной влажности и скорости ветра. Такой подход являлся вынужденным, но методически оправданным, поскольку именно эти характеристики необходимы для расчёта ET_0 методом FAO-56 Penman–Monteith, а POWER обеспечивает пространственно и временно согласованные метеорологические ряды.

Вместе с тем использование реанализа требует учета его ограничений, особенно в условиях сложного горного рельефа Тянь-Шаня. Метеорологические параметры NASA POWER основаны на MERRA-2 и представляют усреднённые характеристики соответствующей ячейки сетки, поэтому фактическая высота и локальные условия станции могут отличаться от характеристик модельной ячейки. NASA отдельно указывает, что в сложном горном рельефе такое различие может быть существенным [13]. Особенно чувствительными являются скорость ветра и влажность, поскольку они зависят от экспозиции склонов, высоты, формы долин и локальной горно-долинной циркуляции. Более того, сама NASA рекомендует интерпретировать данные POWER о ветре как характеристику среднего регионального воздушного потока, а не локального ветрового режима, поскольку местная топография способна существенно изменять ветер.

Поэтому рассчитанные значения ET_0 для станций Шу-Таласского бассейна, обеспеченных данными POWER, следует рассматривать как оценочные климатические характеристики, пригодные для выявления общих пространственных закономерностей, но потенциально содержащие небольшие неопределённости в горных и предгорных районах по сравнению с расчётами непосредственно по данным наземных наблюдений.

Для повышения достоверности расчётов на последующем этапе для таких станций, как Бишкек, Талас и Токмок, данные NASA POWER были применены наземные данные наблюдений из базы NOAA Global Surface Summary of the Day (GSOD) [22]. База GSOD формируется на основе синоптических и почасовых станционных наблюдений и содержит, в частности, среднюю, максимальную и минимальную температуру, точку росы и характеристики скорости ветра, что делает её более предпочтительным источником для станционного расчёта ET_0 при наличии достаточно полных рядов наблюдений.

Для оценки влагообеспеченности полученные результаты имеют принципиальное значение, поскольку показывают, что количество осадков само по себе не отражает реальную степень климатического увлажнения. Более информативным является соотношение осадков и PET, а также абсолютная величина климатического дефицита. Территории с одинаковыми суммами осадков могут существенно различаться по уровню дефицита вследствие неодинакового температурного режима, радиации, влажности воздуха и скорости ветра.

В водохозяйственном планировании зоны с дефицитом более 1200 мм/год должны рассматриваться как приоритетные для внедрения водосберегающих технологий, модернизации оросительных систем, сокращения фильтрационных и испарительных потерь и подбора менее водоемких культур. Районы с дефицитом 1000-1200 мм/год требуют постоянного мониторинга и адаптивного регулирования водопользования. В предгорных и высокогорных районах основной задачей становится сохранение зон формирования стока, поскольку именно они обеспечивают водными ресурсами нижележащие аридные территории [20].

Осадки отличаются значительно большей межгодовой изменчивостью, чем температура. Коэффициент вариации на большинстве станций составляет приблизительно 19-40 %, а на станциях Ит-Агар и Яны-Жер превышает 50 %. Высокая изменчивость означает, что в отдельные годы объем доступной для испарения влаги может резко отличаться от климатической нормы. В многоводные годы увеличение увлажнения способствует росту фактического испарения, тогда как в засушливые годы оно быстро ограничивается недостатком почвенной влаги.

В целом можно выделить в Шу-Таласском бассейне три основные климатические зоны по условиям формирования испарения:

Равнинная аридная зона характеризуется высокой температурой и малым количеством осадков. Здесь потенциальное испарение максимально, но фактическое испарение нередко ограничивается дефицитом доступной влаги.

Предгорная переходная зона отличается умеренно высокой температурой и повышенным количеством осадков. В этих условиях фактическое испарение может быть значительным, поскольку одновременно присутствуют достаточное количество тепла и более устойчивые запасы влаги.

Горная и высокогорная зоны характеризуются низкими температурами и относительно большим количеством осадков. Потенциальное испарение здесь уменьшается, а часть влаги аккумулируется в снежном покрове и участвует в формировании речного стока.

Таким образом, пространственное распределение испарения в Шу-Таласском бассейне определяется не изолированным воздействием температуры или осадков, а их совместным соотношением. В теплых и сухих равнинных районах преобладают высокий испарительный процесс и выраженный дефицит влаги. В предгорьях более значительные осадки частично компенсируют испарительные потери, а в высокогорной части низкая температура ограничивает испарение и способствует аккумуляции воды. При дальнейшем повышении температуры наиболее вероятным последствием станет увеличение потенциального испарения и усиление засушливости прежде всего в равнинной и предгорной частях бассейна, особенно при отсутствии устойчивого роста атмосферных осадков.

Заключение. Таким образом, выполнена комплексная оценка пространственного распределения условий засушливости на территории Шу-Таласского бассейна. Установлено, что ET_0 изменяется от 861 до 1307 мм/год, индекс аридности – от 0,13 до 0,58, климатический дефицит влаги – от 363 до 1039 мм/год, а фактическое испарение – от 156 до 440 мм/год. Полученные результаты свидетельствуют о выраженной пространственной неоднородности тепло- и влагообеспеченности бассейна, формируемой совместным воздействием атмосферного увлажнения, испарительной способности атмосферы, орографии и циркуляционных условий, если точнее:

1. Пространственное распределение ET_0 характеризуется наибольшими значениями в западной и северо-западной частях бассейна, прежде всего в районе станции Тасты, где ET_0 достигает 1155-1307 мм/год. Локальные зоны повышенной испарительной способности атмосферы также формируются в районах Мойынкума-Хантау, Кызыл-Адыра и Кара-Балты. Пониженные значения ET_0 (861-996 мм/год) преобладают в центральных, восточных и юго-восточных районах. Такая пространственная дифференциация связана с сочетанием температурно-влажностного режима, солнечной радиации и ветра, а также влиянием рельефа: в равнинных засушливых районах высокая инсоляция и низкая влажность усиливают испарительный спрос атмосферы, тогда как в предгорных и горных районах его ограничивают понижение температуры и высотная поясность.

2. Индекс аридности изменяется от 0,13 до 0,58, что указывает на преобладание аридных и семиаридных условий при локальном переходе к сухим субвлажным условиям в восточной части бассейна. Наиболее выраженная засушливость характерна для западных и северо-западных равнинных территорий, где низкие суммы атмосферных осадков сочетаются с повышенной ET_0. В направлении юга и юго-востока значения AI увеличиваются, что отражает улучшение условий увлажнения под влиянием орографии Северного Тянь-Шаня, увеличения осадков и снижения потенциальной эвапотранспирации.

3. Климатический дефицит влаги варьирует от 363 до 1039 мм/год и в целом имеет обратную пространственную направленность по отношению к индексу аридности. Максимальный дефицит формируется преимущественно в западной и северо-западной частях бассейна, особенно в районе Тасты, а также локально в районах Мойынкума, Хантау, Кызыл-Адыра и Кара-Балты. Его формирование обусловлено сочетанием недостаточного атмосферного увлажнения и повышенной испарительной потребности атмосферы. В южных и юго-восточных предгорных районах дефицит уменьшается вследствие роста количества осадков и снижения ET_0.

4. Фактическое испарение Ea изменяется от 156 до 440 мм/год и характеризуется увеличением от западных равнинных районов к южным и юго-восточным предгорным территориям. Минимальные значения наблюдаются в западной части бассейна, где фактическое испарение ограничивается недостатком доступной влаги, несмотря на высокую ET_0. Максимальные значения Ea формируются в южных и юго-восточных районах, включая территории Кара-Балты, Бишкека, Токмока и

Иссык-Аты, где увеличение атмосферных осадков обеспечивает наилучшие условия испарения. Такое распределение подтверждает принцип М. И. Будыко: в аридных условиях Ea в первую очередь ограничивается водообеспеченностью, а не потенциальной испарительной способностью атмосферы.

Совместный анализ ET_0, AI, климатического дефицита и Ea показывает, что наиболее климатически уязвимыми являются западные и северо-западные аридные равнинные территории Шу-Таласского бассейна. Здесь одновременно сочетаются повышенная ET_0, низкие значения AI, значительный дефицит влаги и относительно низкое фактическое испарение, ограниченное недостатком осадков. В южных и юго-восточных предгорных районах, напротив, более высокие значения AI и Ea сопровождаются меньшим климатическим дефицитом. Выявленные закономерности отражают ключевую роль орографии, высотной поясности и местной атмосферной циркуляции в перераспределении тепла и влаги и должны учитываться при оценке климатической уязвимости, водообеспеченности и перспективного водохозяйственного планирования в Шу-Таласском бассейне.

Практические рекомендации для митигации в Шу-Таласском бассейне:

1. Приоритетное внедрение водосберегающих технологий (капельное и дождевальное орошение, автоматизированное управление поливами) рекомендуется прежде всего в районах с климатическим дефицитом более 1200 мм/год, где ожидаются наибольшие потери влаги.

2. При планировании структуры посевных площадей рекомендуется учитывать пространственное распределение климатического дефицита влаги, отдавая предпочтение менее водоемким сельскохозяйственным культурам в наиболее засушливых районах бассейна.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по теме: «Водная безопасность Республики Казахстан: трансграничный Шу-Таласский бассейн в условиях климатических изменений и хозяйственной деятельности на период до 2050 года» (ИРН: BR287006/0225)

ЛИТЕРАТУРА

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, 2021. https://doi.org/10.1017/9781009157896

[2] Yang Y., Roderick M. L., Guo H., Miralles D. G., Zhang L., Fatichi S., Luo X., Zhang Y., McVicar T. R., Tu Z., Keenan T. F., Fisher J. B., Gan R., Zhang X., Piao S., Zhang B., Yang D. (2023) // Evapotranspiration on a greening Earth. Nature Reviews Earth & Environment, 4, 626-641. https://doi.org/10.1038/s43017-023-00464-3

[3] Oki T., Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources // Science. 2006. Vol. 313(5790). P. 1068-1072. https://doi.org/10.1126/science.1128845

[4] Middleton N., Thomas D.S.G. (Eds.). World Atlas of Desertification. – Edward Arnold; UNEP, 1992.

[5] Sorg A., Bolch T., Stoffel M., Solomina O., Beniston M. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan, Central Asia // Nature Climate Change. 2012. Vol. 2(10). P. 725-731. https://doi.org/10.1038/nclimate1592

[6] Safina A. River runoff resources of the Shu-Talas water management basin in the context of climate change // Engineering Journal of Satbayev University. 2023. Vol. 145(3). P.25-30. https://doi.org/10.51301/ejsu.2023.i3.04

[7] Монкаева Г. Е. Влияние современного изменения климата на испарение с водной поверхности в Иле-Балкашском бассейне // География и водные ресурсы. – 2024. – № 3. – С. 139-154. https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-3-139-154.32

[8] Chen Y., Li W., Deng H., Fang G., Li Z. Changes in Central Asia's water tower: Past, present and future // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. Article 35458. https://doi.org/10.1038/srep35458

[9] Наурозбаева Ж., Монкаева Г., Жунисова М. и др. Анализ будущих изменений температуры и осадков в Шу-Таласском бассейне (Казахстан) // Гидрометеорология и экология. – 2025. – № 4. – С. 205-220. https://doi.org/10.54668/2789-6323-2025-119-4-205-220

[10] Shuttleworth W.J. Terrestrial Hydrometeorology. – John Wiley & Sons, 2012.

[11] Cherlet M. et al. (Eds.). World Atlas of Desertification. 3rd ed. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018.

[12] База данных результатов наблюдений РГП «Казгидромет». – URL: https://meteo.kazhydromet.kz/database_meteo/ (дата обращения: 26.07.2026).

[13] NASA POWER Data Access Viewer. – URL: https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/ (accessed: 26.07.2026).

[14] Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements / FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. – Rome: FAO, 1998.

[15] Smith M. CROPWAT: A Computer Program for Irrigation Planning and Management / FAO Irrigation and Drainage Paper No. 46. – Rome: FAO, 1992.

[16] Feng S., Fu Q. Expansion of global drylands under a warming climate // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2013. – Vol. 13(19). – P. 10081-10094. https://doi.org/10.5194/acp-13-10081-2013

[17] Greve P. et al. Global assessment of trends in wetting and drying over land // Nature Geoscience. – 2014. – Vol. 7(10). P. 716-721. https://doi.org/10.1038/ngeo2247

[18] Budyko M. I. The Heat Balance of the Earth's Surface. – Washington, D.C.: U.S. Department of Commerce, Weather Bureau, 1958. – 259 p.

[19] Katul G.G. et al. Evapotranspiration: A process driving mass transport and energy exchange // Reviews of Geophysics. – 2012. – Vol. 50(3). – RG3002. https://doi.org/10.1029/2011RG000366

[20] European Bank for Reconstruction and Development. Kyrgyz Republic: Bishkek Solid Waste Project // Environmental and Social Impact Assessment. – London: EBRD, 2012.

[21] Barry R.G., Chorley R.J. Atmosphere, Weather and Climate. 9th ed. – Routledge, 2010.

[22] XX National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Centers for Environmental Information (NCEI). Global Surface Summary of the Day (GSOD), Version 1.0 [Электронный ресурс]. – Asheville, NC: NOAA National Centers for Environmental Information, 1999. – Режим доступа: NOAA Global Surface Summary of the Day (GSOD) (дата обращения: 08.09.2026).

REFERENCES

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, 2021. https://doi.org/10.1017/9781009157896

[2] Yang Y., Roderick M. L., Guo H., Miralles D. G., Zhang L., Fatichi S., Luo X., Zhang Y., McVicar T. R., Tu Z., Keenan T. F., Fisher J. B., Gan R., Zhang X., Piao S., Zhang B., Yang D. (2023). Evapotranspiration on a greening Earth // Nature Reviews Earth & Environment, 4, 626-641. https://doi.org/10.1038/s43017-023-00464-3

[3] Oki T., Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources // Science. 2006. Vol. 313(5790). P. 1068-1072. https://doi.org/10.1126/science.1128845

[4] Middleton N., Thomas D.S.G. (Eds.). World Atlas of Desertification. Edward Arnold; UNEP, 1992.

[5] Sorg A., Bolch T., Stoffel M., Solomina O., Beniston M. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan, Central Asia // Nature Climate Change. 2012. Vol. 2(10). P. 725-731. https://doi.org/10.1038/nclimate1592

[6] Safina A. River runoff resources of the Shu-Talas water management basin in the context of climate change // Engineering Journal of Satbayev University. 2023. Vol. 145(3). P. 25-30. https://doi.org/10.51301/ejsu.2023.i3.04

[7] Monkaeva G. E. Impact of modern climate change on evaporation from water surfaces in the Ili-Balkhash Basin // Geography and Water Resources. 2024. No. 3. P. 139-154. https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-3-139-154.32

[8] Chen Y., Li W., Deng H., Fang G., Li Z. Changes in Central Asia's water tower: Past, present and future // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. Article 35458. https://doi.org/10.1038/srep35458

[9] Naurozbayeva Zh., Monkayeva G., Zhunissova M., et al. Analysis of future temperature and precipitation changes in the Shu-Talas Basin (Kazakhstan) // Hydrometeorology and Ecology. 2025. No. 4. P. 205-220. https://doi.org/10.54668/2789-6323-2025-119-4-205-220

[10] Shuttleworth W.J. Terrestrial Hydrometeorology. John Wiley & Sons, 2012.

[11] Cherlet M. et al. (Eds.). World Atlas of Desertification. 3rd ed. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018.

[12] Database of observation results of RSE "Kazhydromet". URL: https://meteo.kazhydromet.kz/database_meteo/ (дата обращения: 26.07.2026).

[13] NASA POWER Data Access Viewer. URL: https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/ (accessed: 26.07.2026).

[14] Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: FAO, 1998.

[15] Smith M. CROPWAT: A Computer Program for Irrigation Planning and Management. FAO Irrigation and Drainage Paper No.46. Rome: FAO, 1992.

[16] Feng S., Fu Q. Expansion of global drylands under a warming climate // Atmospheric Chemistry and Physics. 2013. Vol. 13(19). P. 10081-10094. https://doi.org/10.5194/acp-13-10081-2013

[17] Greve P. et al. Global assessment of trends in wetting and drying over land // Nature Geoscience. 2014. Vol. 7(10). P. 716-721. https://doi.org/10.1038/ngeo2247

[18] Budyko M. I. The Heat Balance of the Earth's Surface. – Washington, D.C.: U.S. Department of Commerce, Weather Bureau, 1958. 259 p.

[19] Katul G.G. et al. Evapotranspiration: A process driving mass transport and energy exchange // Reviews of Geophysics. 2012. Vol. 50(3). RG3002. https://doi.org/10.1029/2011RG000366

[20] European Bank for Reconstruction and Development. Kyrgyz Republic: Bishkek Solid Waste Project. Environmental and Social Impact Assessment. London: EBRD, 2012.

[21] Barry R.G., Chorley R.J. Atmosphere, Weather and Climate. 9th ed. Routledge, 2010.

[22] XX National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Centers for Environmental Information (NCEI). Global Surface Summary of the Day (GSOD), Version 1.0 [Electronic resource]. – Asheville, NC: NOAA National Centers for Environmental Information, 1999. – NOAA Global Surface Summary of the Day (GSOD) (date of access: 08.09.2026).

Ж. К. Наурозбаева[1], Г. Е. Монкаева[*2], М. А. Жунисова[3], Н. Е. Рахматулла[4] , К. С. Оразбекова[5]

[1] PhD Өңірлік климаттық өзгеруі зертханасының меңгерушісі («География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; *naurozbaeva.zhanar@mail.ru*)
[2 *] Ғылыми қызметкері (География және су қауіпсіздігі институты АҚ, Алматы, Қазақстан; ***erzanovasara@gmail.com***)
[3] Ғылыми қызметкері («География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; *makpal80@mail.ru*)
[4] Кіші ғылыми қызметкері («География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; *nurkanat.rakhmatulla@mail.ru*)
[5] PhD Бас ғылыми хатшы («География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Казахстан; *Kuralay_orazbekova@mail.ru*)

ШУ-ТАЛАС АЛАБЫНДАҒЫ ҚАЗІРГІ ҚҰРҒАҚШЫЛЫҚ ЖАҒДАЙЛАРЫ МЕН ПОТЕНЦИАЛДЫ БУЛАНУ ТРАНСПИРАЦИЯНЫҢ КЕҢІСТІКТІК ТАРАЛУЫ

Аннотация. Мақалада 1991-2020 жылдардағы Климаттық кезеңдегі Шу–Талас бассейніндегі потенциалды буланудың (ET_0), нақты буланудың (Ea), аридтілік индексінің (AI) және климаттық ылғал тапшылығының кеңістіктік таралуын кешенді бағалау жүргізілді. et пен Пенман-Монтейттің FAO-56 әдісімен есептелген, нақты булану – М. И. Будыко теңдеуіне негізделген, құрғақшылық шарттары UNEP классификациясы бойынша аридтілік индексін қолдана отырып бағаланады, ал кеңістіктік талдау ГАЖ технологиялары арқылы жүзеге асырылады. ET_0 жылына 861-1307 мм, нақты булану жылына 156-440 мм, құрғақтық индексі 0,13-0,58 және климаттық ылғал тапшылығы жылына 363-1039 мм аралығында өзгеретіні анықталды. Ең айқын құрғақтық бассейннің батыс және солтүстік-батыс жазық аймақтарына тән, мұнда атмосфераның булану қажеттілігінің жоғарылауы жауын-шашынның жеткіліксіздігімен біріктіріліп, төмен аі мәндерін, жоғары Климаттық тапшылықты қалыптастырады және нақты буланууды шектейді. Оңтүстік және оңтүстік-шығыс тау бөктеріндегі аудандар бағытында AI және Ea мәндері артып келеді, ал Климаттық тапшылық атмосфералық ылғалдың жақсаруы мен et_0 төмендеуіне байланысты азаяды. Зерттелетін сипаттамалардың кеңістіктік дифференциациясы температура мен жауын-шашын режимінің, радиациялық және жел жағдайларының, орографияның және жергілікті атмосфералық айналымның бірлескен әсерімен анықталады. Нәтижелер климаттың ең осал аймақтарын бөліп көрсетуге мүмкіндік береді және сумен қамтамасыз етуді бағалау, климаттық тәуекелдерді аудандастыру және Шу–Талас бассейнінің су ресурстарын ұтымды пайдалануды жоспарлау кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: Шу-Талас алабы, потенциалды буланутранспирация; аридтілік индексі; климаттық ылғал тапшылығы; климаттың өзгеруі.

Zh. K. Naurozbayeva[1], G. Ye. Monkayeva[*2], M. A. Zhunissova[3], N. Ye. Rakhmatulla[4], K. S. Orazbekova[5]

[1] PhD Head of the Regional Climate Change Laboratory (JSC ‘Institute of Geography and Water Security’, Almaty, Kazakhstan; *naurozbaeva.zhanar@mail.ru*)
[2 *] Researcher (JSC ‘Institute of Geography and Water Security’, Almaty, Kazakhstan; ***erzanovasara@gmail.com***)
[3] Researcher (Institute of Geography and Water Security, Almaty, Kazakhstan; makpal80@mail.ru)
[4] Junior Researcher (Institute of Geography and Water Security JSC, Almaty, Kazakhstan; *nurkanat.rakhmatulla@mail.ru*)
[5] PhD, Chief scientific secretary (JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; *Kuralay_orazbekova@mail.ru*)

CONTEMPORARY SPATIAL DISTRIBUTION OF ARIDITY CONDITIONS AND POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION IN THE CHU-TALAS BASIN

Abstract. The article presents a comprehensive assessment of the spatial distribution of potential evapotranspiration (ET_0), actual evapotranspiration (Ea), the aridity index (AI), and climatic moisture deficit in the Shu–Talas Basin for the 1991–2020 climatological period. ET_0 was calculated using the FAO-56 Penman–Monteith method, actual evapotranspiration was estimated using the M. I. Budyko equation, aridity conditions were assessed using the UNEP aridity index classification, and spatial analysis was performed using GIS technologies. ET_0 was found to range from 861 to 1,307 mm/year, actual evapotranspiration from 156 to 440 mm/year, the aridity index from 0.13 to 0.58, and the climatic moisture deficit from 363 to 1,039 mm/year. The most pronounced aridity is characteristic of the western and northwestern lowland areas of the basin, where high atmospheric evaporative demand is combined with insufficient precipitation, resulting in low AI values, a high climatic moisture deficit, and limited actual evapotranspiration. Towards the southern and southeastern foothill areas, AI and Ea increase, while the climatic moisture deficit generally decreases due to improved atmospheric moisture conditions and lower ET_0. The spatial differentiation of the studied characteristics is determined by the combined influence of air temperature and precipitation patterns, radiation and wind conditions, orography, and local atmospheric circulation. The results allow the identification of the most climatically vulnerable areas and can be used for assessing water availability, climate risk zoning, and planning the sustainable use of water resources in the Shu–Talas Basin.

Keywords: Chu-Talas basin, potential evapotranspiration; aridity index; climatic moisture deficit; climate change.