

Моделирование элементов водного баланса бассейна реки Сарысу на основе данных гидрологических и климатических наблюдений

Жумахан Мустафаев¹, Гульмира Адильбектеги^{*2}, Канат Мустафаев³, Куаныш Абдешев⁴, Гулнур Саспугаева², Нуржан Турсынбаев²

¹АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; z-mustafa@rambler.ru

²Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; adilbektegi_ga@enu.kz, gulnur_erzhanovna@mail.ru, nurANT_78@mail.ru

³ТОО «Genc kz construction», Алматы, Казахстан; kmustafaev@gmail.com

⁴Южно-Казахстанский государственный университет имени М. Ауезова, Шымкент, Казахстан; abdeshev.kuanysh@mail.ru

*Корреспонденция: adilbektegi_ga@enu.kz

Цитирование: Мустафаев, Ж., Адильбектеги, Г., Мустафаев, К., Абдешев, К., Саспугаева, Г., Турсынбаев, Н. (2025). Моделирование элементов водного баланса бассейна реки Сарысу на основе данных гидрологических и климатических наблюдений. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География. Экология, 150(1), 129-151.

<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-150-1-129-151>

Академический редактор:
Н.Е. Рамазанова

Поступила: 05.01.2025
Исправлена: 31.01.2025
Принята: 11.03.2025
Опубликована: 31.03.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Аннотация. Для анализа и оценки водных ресурсов в зоне формирования стока бассейна реки Сарысу использованы данные о среднегодовых расходах воды рек Жаман-Сарысу, Жаксы-Сарысу, Атасу, Кара-Кенгир, Жыланды, Жезды, Токрау, а также информация о годовых осадках, зарегистрированных на метеорологических станциях Аксу-Аюлы, Агадыр, Актогай и Улытау, относительно равномерно расположенных в пределах низгорья Казахского мелкосопочника, за период наблюдений с 1940 по 2021 годы. Анализ и оценка на основе достаточно длительных временных рядов гидрологического стока рек и годовых атмосферных осадков бассейна реки Сарысу с использованием методов разностных интегральных кривых показывают наличие циклических колебаний, обусловленных многообразием реакции водосборов на выпадающие осадки, которые носят синхронный характер, включая кратковременные циклы, характерные для отдельных фаз подъема и спада. Статистически обоснованная оценка параметров линейно-корреляционного уравнения водного баланса рек, характеризующего зависимость гидрологического стока от атмосферных осадков, выпадающих на водосборе бассейна реки Сарысу, служит научной основой для разработки математических моделей элементов водного баланса. Эти модели включают потенциально-возможный слой речного стока, запасы почвенного покрова по испарению, испарение атмосферных осадков в процессе водообразования, суммарное испарение и паводковый сток, основанные на математических и физических характеристиках коэффициента регрессии.

Ключевые слова: уравнение водного баланса, линейно-корреляционное уравнение, речной сток, атмосферные осадки, коэффициент регрессии, суммарное испарение, влагозапасы почвенного покрова.

1. Введение

Уравнение водного баланса водосбора речных бассейнов, базирующегося на тезисе Воейкова, А.И. – «река - продукт климата», подразумевает, что среднегодовой речной сток является функцией годовых атмосферных осадков и испарения, отражающих то соотношение тепла и влаги, которое свойственно данной географической зоне, которое за известный промежуток времени характеризуется балансом прихода и расхода энергии, иначе говоря, законом сохранения энергии. На основе генетической теории речного стока, основанной на законе сохранения энергии и раскрывающей причинные связи не только стока, но и элементов водного баланса, знаменитым ученым Воейковым, А.И. (1949) впервые было предложено трехчленное уравнение: $AP_i = RF_i + TE_i$ (где AP - атмосферные осадки, мм; RF_i - речной сток, мм; TE_i - суммарное испарение, мм), которое в определенной степени характеризует линейную связь слоя речного стока (RF_i) со слоем атмосферных осадков (AP_i), и имеет следующий вид: $RF_i = k \cdot AP_i + b$ (где k - коэффициент регрессии; b - свободный член уравнения). Это уравнение стало объектом исследования в области прикладной гидрологии.

Коэффициент регрессии (k) корреляционных зависимостей среднегодовых слоев речного стока (RF_i) от атмосферных осадков (AP_i) в теории математической статистики представляет собой произведение коэффициента корреляции между переменными RF_i и AP_i на соотношение среднеквадратических отклонений каждой переменной SD_{AP_i} и SD_{RF_i} :

$$k = R_{AP \cdot RF_i} (SD_{RF_i} / SD_{AP_i}), \quad (1)$$

где $R_{AP \cdot RF_i}$ - коэффициент корреляции между среднегодовым слоем речного стока (RF_i) и атмосферными осадками (AP_i); SD_{RF_i} - среднеквадратическое отклонение среднегодовых слоев речного стока (RF_i); SD_{AP_i} - среднеквадратическое отклонение атмосферных осадков (AP_i).

На протяжении более 100 лет было выполнено множество исследований, основанных на предложениях Воейкова, А.И. в которых предпринимались попытки направленные на совершенствование структуры уравнения водного баланса речных бассейнов. Эти исследования опирались на логические соображения и естественнонаучные представления о механизмах формирования гидрологического стока как функции атмосферных осадков:

- в области гидрологии известно уравнение водного баланса речных бассейнов для многолетнего периода, предложенное Великановым, М.А. (1948), Алексеевым, А.Г. (1948) и Куделиным, Б.И. (1960), на основе генетической теории стока, созданной Бефани, А.Н. (1957), где отражается реальное питание подземных вод и инфильтрации за счет атмосферных осадков, которые существует в природе параллельно друг другу, со своим условием формирования;

- из истории развития создания теории водно-балансовых уравнений речных бассейнов известны работы Келлера, Г. (1965), Ольдекопа, Э.М. (1911), Великанова, М.А. (1948) и Оппокова, Е.В. (1935), которые предложили модель коэффициента стока (RC_i), являющейся одной из модификаций уравнения водного баланса речных бассейнов:

$$\begin{aligned}
 RC_i &= \alpha - (b/AP_i) \rightarrow RC_i = 1 - th(TE_i/AP_i) \rightarrow F/AP_i = \\
 &= \alpha - (b/AP_i) \rightarrow RF_i/AP_i = (\alpha \cdot AP_i - b)/AP_i \rightarrow RF_i = \alpha \cdot AP_i + b \rightarrow \\
 &\rightarrow dRF_i/dAP_i + dTE_i/AP_i = 1 \rightarrow RR_i = \alpha \cdot AP_i + b \rightarrow TE_i = \\
 &= (1 - \alpha) \cdot AP_i - b,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где α и $(1 - \alpha)$ - тангенсы углов наклона прямых; b - постоянная интегрирования;

- для учета территориальной неоднородности формирования водного баланса речных бассейнов, имеющих разное генетическое происхождение, Львович, М.И. (1974) впервые предложил шестикомпонентную систему уравнений водного баланса: $(AP_i = SCRF_i + UCRF_i + QMT_i; RF_i = SCRF_i + UCRF_i; QMT = AP_i - SCRF_i = UCRF_i + TE_i; EC_i = UCRF_i / QMT_i; CQR_i = 1 - EC_i = TE_i / QMT_i)$, где $SCRF_i$ - поверхностная составляющая речного стока; $UCRF_i$ - подземная составляющая речного стока; QMT_i - валовое увлажнение территории; EC_i - коэффициент испарения; CQR_i - коэффициент питания рек подземными водами. Эти уравнения в явном виде не учитывают потери атмосферных осадков на инфильтрационное питание грунтовых вод, и с целью устранения этих недостатков Коронкевич, Н.И. (2005) разработал уравнение водного баланса многолетнего периода полиструктурного водного баланса, состоящего из девяти блоков.

Одним из фундаментальных направлений по оценке водного баланса речных бассейнов является направление, развиваемое в работах Исмайылова, Г.Х., Федорова, В.М. (Исмайылова и др., 2011), Исмайыловой, И.Г., Исмайылова, Г.Х., Муращенковой, Н.В., Перминова, А.В. (Исмайылова и др., 2022), Исмайыловой, И.Г., Раткович, Л.Д. (Исмайылова и др., 2023), Ахмедовой, Н.Р., Наумова, Н.Р. (Ахмедова и др., 2023), связанное с представлением о стохастической природе процессов формирования четырехчленного уравнения водного баланса речных бассейнов, включающего атмосферные осадки (AP_i), речной сток (RR_i), суммарное испарение (TE_i) и изменение бассейновых влагозапасов (BMR_i) в следующем виде $AP_i + \Delta BMR_i = RF_i + TE_i$, что предопределило вероятностное описание их во времени и пространстве, базирующееся на наблюдении их временных рядов и, стало новым подходом в определении трудно измеряемых элементов водного баланса, таких как суммарное испарение и изменение бассейновых влагозапасов.

Эмпирическая гидрологическая модель на основе модульной сетки для решения практических вопросов, связанных с управлением водными ресурсами речных бассейнов, успешно применялась в типичных гидрологических условиях на территории Восточной Азии (Dadhwal et al., 2010; Bhattacharya et al., 2013; Jin et al., 2024; Han et al., 2024), Европы (Tzoraki et al., 2011; Panagopoulos et al., 2015; Marinou et al., 2017; Passaretti et al., 2022; Tolika et al., 2024; Estrada et al., 2024), Америки (Warszawski et al., 2013; Al-Lafta et al., 2013; Syed et al., 2014; Vanderkelen et al., 2018; Harding, 2024) и Африки (Alemaw, 2006; Querner et al., 2016; Belete et al., 2018), где параметры моделей сохранили свой физический смысл, а рассчитанные элементы водного баланса сопоставимы для использованных моделей.

На основе развития и углубления известной в гидрологии теории генетического стока, базирующейся на линейно-корреляционной модели с линейной связью слоя речного стока (RF_i) со слоем атмосферных осадков (AP_i), были проведены исследования Иофина, З.К. (2013). В этих исследованиях, на основе водно-балансовой концепции, было разработано линейно-корреляционное уравнение водного баланса, позволяющее оценить большое количество водно-балансовых параметров (10 параметров), в том числе, таких трудно определяемых, как суммарное испарение (TE_i), испарение с водной поверхности ($ETWS_i$), инфильтрация (IF_i), слой инфильтрационного питания ($IFNI_i$), влажность почвы (SM_i), запасы воды в почве (SWR_i), слой капиллярного поднятия (CRI_i) и слой внутрипочвенного стока (SDI_i). Совокупность этих параметров формирует потери атмосферных осадков (IAP_i), которые оцениваются с использованием метода наименьших прямоугольников.

Методы изучения развития гидрологических процессов, основанные на физическом анализе элементов водного баланса речных бассейнов и позволяющие глубже проникнуть во внутреннюю их структуру, показали, что все приведенные выше уравнения основываются на трехчленной зависимости водного баланса (атмосферные осадки, суммарное испарение, речной сток), в рамках которых открывается возможность проанализировать и спрогнозировать динамику речного стока и элементов водного баланса речных бассейнов как функции атмосферных осадков во временных и пространственных аспектах.

Исходя из изложенного, следует отметить, что совершенствование естественно-научных представлений о теории водного баланса на водосборных территориях речных бассейнов на основе генетической теории стока, базирующейся на материалистической теории научного познания, где атмосферные осадки рассматриваются как важные средообразующие факторы, является актуальным направлением исследований в области гидрологии.

Цель исследования – оценка математических признаков и физического содержания линейно-корреляционного уравнения водного баланса речных бассейнов для получения прогнозных характеристик речного стока на предстоящий период в условиях климатических изменений.

Научная новизна заключается в создании гидрологической математической модели элементов водного баланса рек на примере бассейна реки Сарысу. Модель основана на разработке системы линейно-корреляционных уравнений, описывающих взаимосвязь стока с атмосферными осадками. Эта система позволяет получать ценную информацию об устойчивости, синхронности и цикличности водно-балансовых процессов, учитывая различные предположения о количественных и качественных характеристиках исследуемого явления.

Объект исследования. Водосборное пространство бассейна реки Сарысу относится к Нура-Сарысускому водохозяйственному бассейну, охватывающему южную часть Казахского мелкосопочника и пустыни Бетпақдала. Площадь водосбора составляет 136628,54 км², и этот регион тяготеет к Аральскому и Балхашскому бассейнам (рисунок 1).

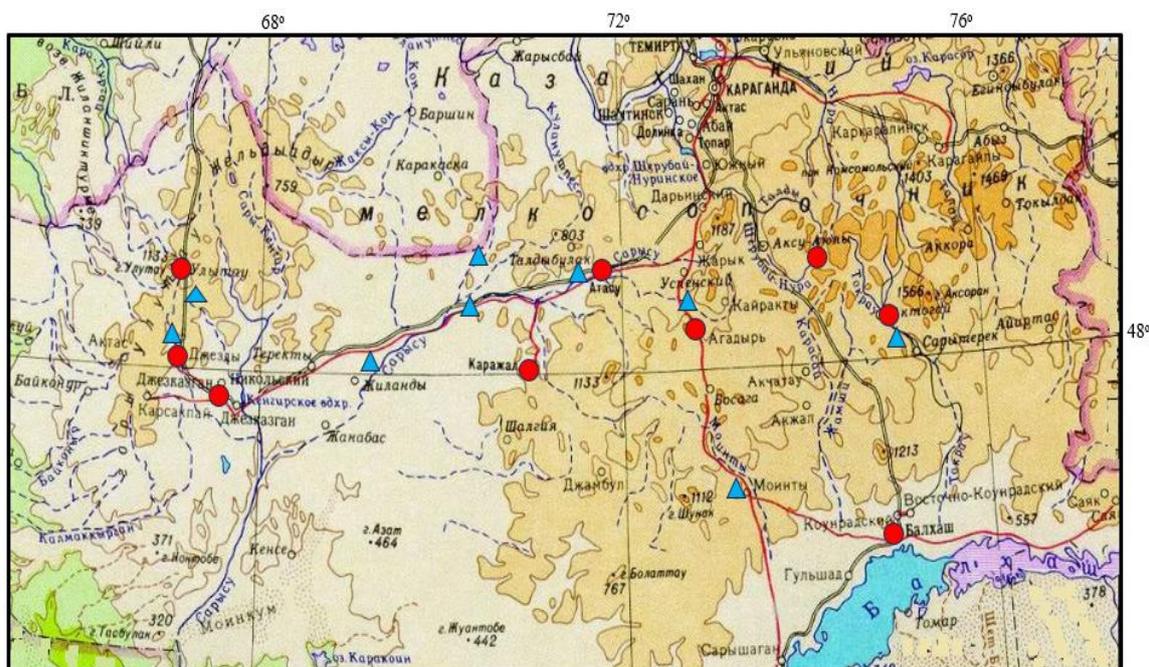


Рисунок 1. Схема расположения метеорологических станций (красная точка) и гидрологических постов (синий треугольник) в бассейне реки Сарысу

В центральной части мелкосопочника расположена горная система Бугулы (высшая точка - гора Буркитти, 1184 м), Жаксы-Тагылы, Космурын и Ортау (высшая точка - 1068 м), где формируются стоки рек Жаман-Сарысу и Жаксы-Сарысу. При их слиянии образуется река Сарысу, а ниже к ней присоединяются левобережные притоки Талды-Манака и Атасу. На западной части мелкосопочника возвышаются горы Улытау и Арғанаты, с восточных склонов которых формируются стоки рек Кара-Кенгир, Жыланды и Жезды. В восточной части мелкосопочника южного Казахского нагорья Бектау-Ата, Аксоран, Кызылтас и Кызылрай, где на высоте около 900 м берут начало реки Токрау и Мойынты. Площадь водосбора этих рек составляет соответственно 2920 км² и 953 км².

Все реки бассейна реки Сарысу имеют преимущественно снеговое питание, которое относится к казахстанскому типу, где почти весь сток приходится в период весеннего половодья, сменяющегося с продолжительной и низкой меженью в остальное время года.

На территории бассейна реки Сарысу расположены пять субъектов Республики Казахстан: Карагандинская, Жамбылская, Кызылординская, Актюбинская области и область Улытау, что определяет научную и практическую целесообразность статистического обоснования влияния климатических факторов на многолетние изменения стока бассейна реки Сарысу, выполняющего важные средообразующие и экологические функции.

2. Материалы и методы

В качестве информационно-аналитической базы по гидрологическому исследованию использованы среднегодовые расходы воды рек Жаман-Сарысу, Жаксы-Сарысу, Атасу, Кара-Кенгир, Жыланды, Жезды, Токрау и Мойынты, на основе материалов «Ресурсы поверхностных вод СССР» (Ресурсы поверхностных вод СССР, Центральный и Южный Казахстан. (1966)), «Государственный водный кадастр, Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод, Республики Казахстан» (1938-1989, 1989-2000, 2003-2023) с восстановлением пропущенных временных рядов за период 1940-2021 годы.

Базы исследований по климатическими показателями созданы на основе многолетних информационно-аналитических данных метеорологических станций Агадыр, Аксу-Аюлы, Актогай, Атасу и Улытау, расположенных в зоне формирования стока рек бассейна реки Сарысу, и базирующихся на архивных материалах РГП «Казгидромет», Справочника по климату СССР, Научно-прикладного справочника по климату СССР, Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) и справочно-информационного портала «Погода и климат», которые включают годы с различной природно-климатической обстановкой за период 1940-2021 годы (таблица 1).

Таблица 1. Основные гидрометеорологические характеристики рек водосбора бассейна реки Сарысу

Река	Площадь водосбора, км ²	Отметка нуля поста, м	Метеорологическая станция	Высота, м
Жаман-Сарысу	5210,0	773,0	Агадыр	694,0
Жаксы-Сарысу	570,0	637,0	Аксу-Аюлы	724,0
Атасу	2790,0	687,0	Агадыр	694,0
Кара-Кенгир	9860,0	567,0	Улытау	350,0
Жыланды	175,0	583,0	Улытау	350,0
Жезды	2410,0	518,0	Улытау	350,0
Токрау	2920,0	964,0	Актогай	780,0
Мойынты	953,0	834,0	Агадыр	694,0

При изучении структуры уравнения водного баланса речных бассейнов использованы методы математико-статистического анализа временных рядов гидрологических и климатических информаций, базирующихся на линейно-корреляционных уравнениях, характеризующих зависимости слоя речного стока от слоя атмосферных осадков. Для оценки значимости линейно-корреляционных уравнений водного баланса использован показатель эффективности Нэша-Сатклиффа, которой широко используется в мировой практике при гидрологическом моделировании и прогнозировании (Morigasi et al., 2007; Koch et al., 2013), и который равен индексу детерминации (R^2), выраженное квадратом линейного коэффициента корреляции ($R = \sqrt{R^2}$) (Потахова, 2015), для этого приняты критерии градации качества (Кадочникова и др., 2023) (таблица 2).

Таблица 2. Критерии градации качества для оценки значимости линейно-корреляционных уравнений водного баланса (шкала Чеддока)

Интерпретация	Критерии качества	
	индекс детерминации (R^2)	коэффициент корреляции (R)
Очень слабая	<0,29	<0,54
Слабая	0,30-0,41	0,55-0,64
Средняя	0,42-0,55	0,65-0,74
Сильная	0,56-0,70	0,75-0,84
Очень сильная	>0,71	>0,85

Слой речного стока (RRI_i , мм), как расчетная величина, представляющая отношение объема стока (VRF_i , км³) к площади водосбора (CA_i , км²) имеет следующий вид:

$$RRI_i = VRF_i \cdot 10^9 / CA_i \cdot 10^6 \rightarrow VRF_i \cdot 10^3 / CA_i \rightarrow VRF_i \cdot 10^3 \cdot 10^3 / CA_i, \quad (3)$$

где VRF_i - объем речного стока, км³: $VRF_i = 31526000 \cdot AAWC_i / 10^9 = 31,536 \cdot AAWC_i / 10^3$, км³; $AAWC_i$ - среднегодовой расход воды в речных бассейнах, м³/с; 31526000- количество секунда в годах; 10^9 - переводное число от км³ на м³; 10^6 - переводное число от км² на м²; 10^3 - переводное число от метра в миллиметр.

Для оценки циклических многолетних колебаний речного стока и определяющих их факторов на изучаемой территории использован метод построения разностных интегральных кривых с целью выявления их тенденции изменения и синхронности изучаемых процессов:

$$\begin{aligned} AMV_i &= (1/n) \cdot \sum_{i=1}^n AAWC_i \rightarrow MC_i = AAWC_i / AMV_i \rightarrow \\ &\rightarrow (MC_i - 1) \rightarrow \sum_{i=1}^n (MC_i - 1) \rightarrow \sum_{i=1}^n (MC_i - 1)^2 \rightarrow \sum_{i=1}^n (MC_i - 1)^3 \rightarrow \\ &\rightarrow CV_i = \{[\sum_{i=1}^n (MC_i - 1)^2] / (n - 1)\}^{1/2} \rightarrow \sum_{i=1}^n (MC_i - 1) / CV_i \rightarrow \\ &\rightarrow CA_i = \{[\sum_{i=1}^n (MC_i - 1)^3] / (n - 1)\}^{1/2}; \\ SD_i &= AMV_i \cdot CV_i = AMV_i \cdot \{[\sum_{i=1}^n (MC_i - 1)^2] / (n - 1)\}^{1/2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где AMV_i - среднеарифметическое значение, определяемое в зависимости от числа лет гидрометрических и климатических наблюдений; $AAWC_i$ - среднегодовые или годовые значения, определяемые в зависимости от числа лет гидрометрических и климатических наблюдений; MC_i - модульный коэффициент рассматриваемой гидрологической и климатической характеристики; CV_i - коэффициент вариации; CA_i - коэффициент асимметрии; SD_i - среднее квадратическое отклонение.

Основное математическое свойство разностной интегральной кривой заключается в том, что отклонение модульного коэффициента (MC_i) за любой интервал времени (TI_i) от среднего значения (AMV_i) за рассматриваемый период наблюдений характеризуется тангенсом угла наклона линии (tga_i), соединяющей точки начала и конца интервала, к горизонтальной прямой, показывающий тенденцию и направленность этого процесса. Физические свойства их проявляются, когда интегральная кривая поднимается вверх относительно горизонтальной линии ($MC_i - 1$) > 1, и показывает многоводную фазу колебаний стока, а если кривая наклонена вниз ($MC_i - 1$) < 1, тогда соответствует маловодной фазе и между ними существует две точки пересечения ими горизонтальной прямой за рассматриваемый период равный ($MC_i - 1$) = 0, что показывает начало и конец полного цикла колебаний водности речного бассейна.

3. Результаты

По климатическим условиям территория водосбора бассейна реки Сарысу резко отличается большой континентальностью и низкой естественной увлажненностью, что объясняется её географическим положением внутри Евразийского материка и удаленностью от больших водных пространств. В связи с этим гидрологический режим рек на территории водосбора бассейна реки Сарысу определяется общим характером естественного увлажнения, который перекрывает влияние всех других факторов.

Ведущими климатическими факторами, определяющими гидрологический сток рек бассейна Сарысу, являются в основном осадки холодного и теплого периодов года, а также температура и влажность воздуха летом, характеризующие испаряющую способность природной системы. Совокупность этих факторов формирует механизм колебаний годового стока и определяет синхронность и цикличность водно-балансовых процессов.

Анализ цикличности многолетних колебаний речного стока рек и атмосферных осадков на территории водосбора бассейна реки Сарысу с использованием метода построения разностных интегральных кривых может рассматриваться как один из этапов изучения их интегральных и динамических характеристик с целью выявления тенденций и направлений изменения этого процесса (рисунок 2).

Как видно из рисунка 2, цикличность среднегодовых расходов воды рек на территории водосбора бассейна реки достаточно хорошо коррелируется с цикличностью годовых атмосферных осадков. В то же время некоторые противофазные явления, встречающиеся за рассматриваемый период, прежде всего обусловлены накапливаемым снежным покровом не только в холодный период текущего года, но и за предыдущий год, который является основным источником формирования стока.

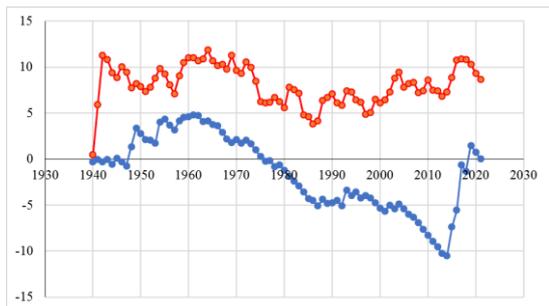
При этом выявленные изменения режима многолетних колебаний стока и осадков в бассейне реки Сарысу отражают физико-географические условия формирования речного стока в низкогорьях Казахского мелкосопочника, поскольку сила проявления ритмов в многолетних колебаниях неодинакова:

- в реках, берущих начало в горах Кызылтас, Бугулы, Жаксы-Тагылы, Космурын и Ортау, расположенных в центральной части низкогорья Казахского мелкосопочника Жаман-Сарысу, наблюдается синхронность между среднегодовым расходом воды и атмосферными осадками, для реки Жаксы-Сарысу асинхронность в 1950-2010 годы сменяется синхронностью, а для реки Атасу синхронность в 1940-1990 годы сменяется асинхронностью за рассматриваемый период;

- в реке Кара-Кенгир и его притоках Жыланды и Жезды, формирующихся в горах Улытау, расположенных в западной части низкогорья Казахского мелкосопочника, наблюдается асинхронность между среднегодовым расходом воды и атмосферными осадками, что обусловлено морфометрическими характеристиками, а также гидрогеологическими и климатическими условиями;

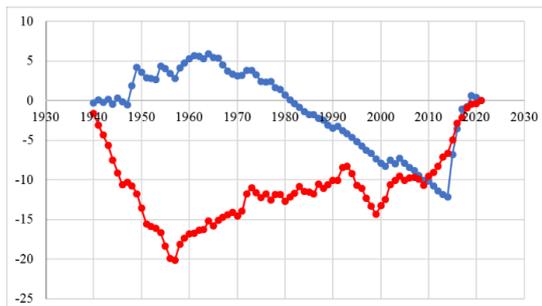
- в реке Токрау, формирующегося на северных склонах горы Аксоран, расположенного в восточной части низкогорья Казахского мелкосопочника и текущего в сторону озера Балхаш, наблюдается существенная асинхронность за рассматриваемый период, тогда как в реке Моинты синхронность за период 1940-1985 годы сменяется асинхронностью, обусловленной в основном ходом атмосферных осадков и в значительно меньшей степени температурным режимом.

Проявление синхронности или асинхронности в изменении среднегодового расхода воды рек и атмосферных осадков, как стокообразующий фактор, обусловлен безвозвратными потерями стока и атмосферных осадков в процессе водообразования.



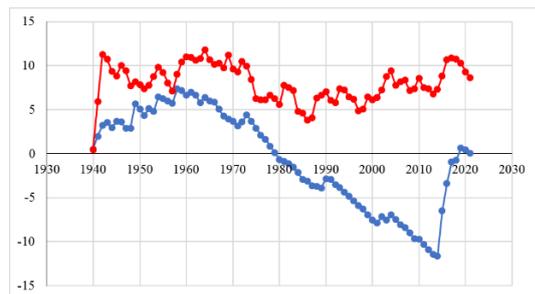
(а)

Река Жаман-Сарысу – м.с. Агадыр



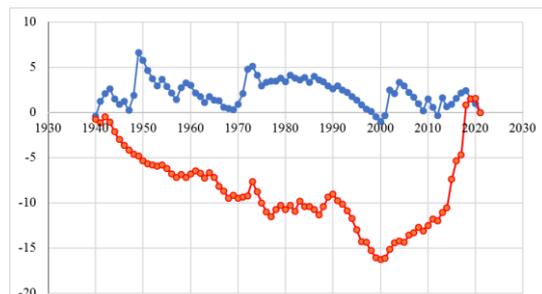
(б)

Река Жаксы-Сарысу – м.с. Аксу-Аюлы



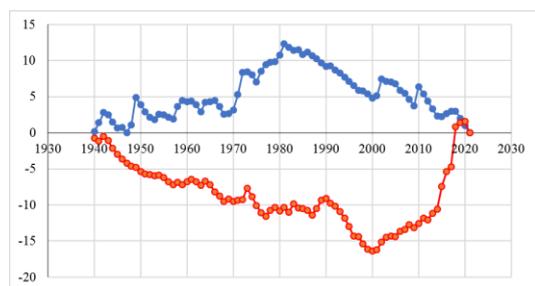
(в)

Река Атасу – м.с. Агадыр



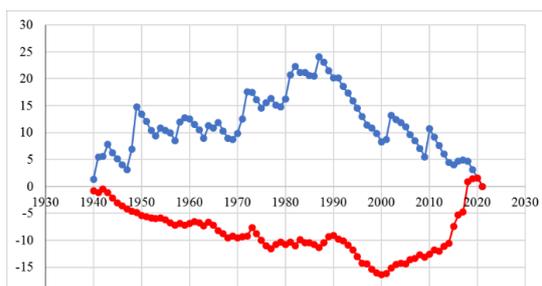
(г)

Река Кара-Кенгир – м.с. Улытау



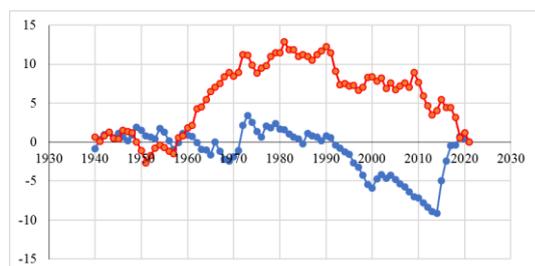
(д)

Река Жыланды – м.с. Улытау



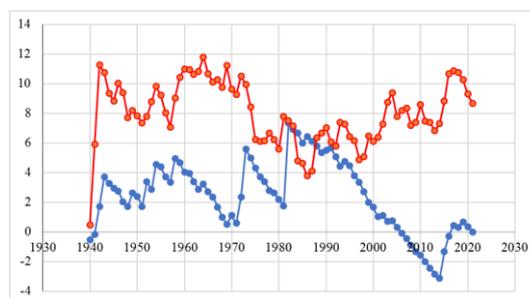
(е)

Река Жезды – м.с. Улытау



(ж)

Река Токрау – м.с. Актогай



(з)

Река Мойынты – м.с. Агадыр

Рисунок 2. Разностная интегральная кривая среднегодовых расходов воды рек (1- левая ордината) и сумм годовых осадков (2-правая ордината) на территории водосбора бассейна реки Сарысу: а - Река Жаман-Сарысу – м.с. Агадыр; б - Река Жаксы-Сарысу – м.с. Аксу-Аюлы; в - Река Атасу – м.с. Агадыр; г - Река Кара-Кенгир – м.с. Улытау; д - Река Жыланды – м.с. Улытау; е - Река Жезды – м.с. Улытау; ж - Река Токрау – м.с. Актогай; з - Река Мойынты – м.с. Агадыр.

На основе созданной базы данных по гидрологическому режиму рек и климатических показателей в водосборе бассейна реки Сарысу была проведена их статическая обработка с использованием стандартных пакетов Statistica и Excel, а пространственно-временный анализ гидрологических и климатических характеристик с помощью пакета ArcViewGis 3.2, в результате чего получены статистические параметры среднегодового расхода воды рек и годовых атмосферных осадков, которые приведены в таблице 3.

Надежность и достоверность полученных статистических характеристик рек на территории водосбора бассейна реки Сарысу базируются, во-первых, на применении физически обоснованной модели многолетних колебаний стока, которая отражает суммарную изменчивость временного рядов среднегодового расхода воды рек и годовых атмосферных осадков, во-вторых, на применении современных математических методов обработки с использованием цифровых технологий.

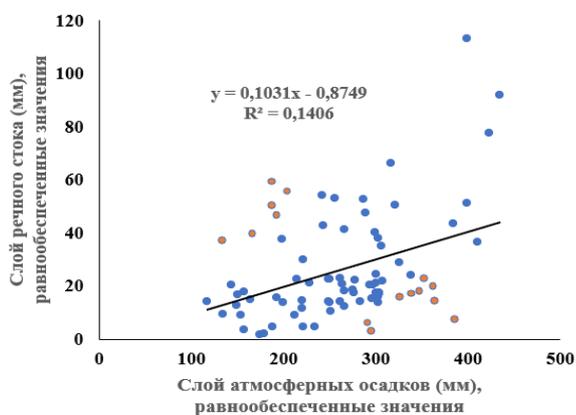
Таблица 3. Статистические параметры среднегодового расхода воды рек и годовых атмосферных осадков в водосборе бассейна реки Сарысу

Наименование объекта	Статистические показатели			
	среднеарифметические (AMV_i)	коэффициент вариации (CV_i)	коэффициент асимметрии (CA_i)	среднеквадратические отклонения (SD_i)
Среднегодовой расход воды рек (m^3/c) в водосборе бассейна реки Сарысу				
Жаман-Сарысу	0,729	1,339	2,565	0,976
Жаксы-Сарысу	0,644	1,079	2,930	0,695
Атасу	0,5692	1,148	2,669	0,680
Кара-Кенгир	3,944	0,819	1,981	3,272
Жыланды	1,241	0,932	1,614	1,157
Жезды	0,500	1,219	1,745	0,610
Токрау	2,436	0,775	1,748	1,889
Мойынты	0,253	1,392	3,083	0,353

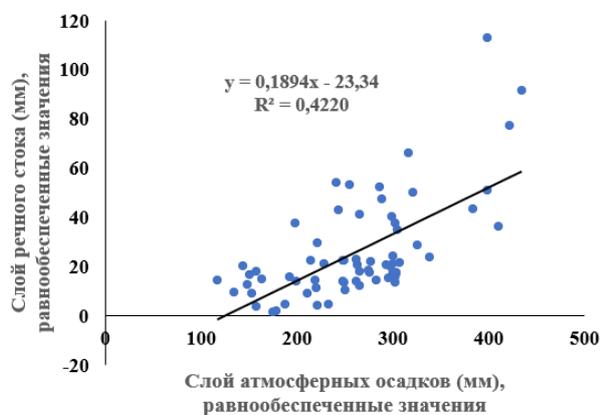
Годовые атмосферные осадки, мм				
Аксу-Аюлы	314,744	0,256	-0,114	80,786
Агадыр	216,000	0,221	0,105	47,675
Актогай	210,195	0,288	-0,137	60,527
Улытау	355,000	0,288	2,508	102,473

Анализ и оценка структуры временного ряда среднегодового расхода воды рек и годовых атмосферных осадков бассейна реки Сарысу показывает наличие случайных выбросов, то есть, резко выделяющихся наблюдений, вызванных какими-то исключительными гидрологическими и климатическими событиями. Для демонстрации эффекта равнообеспеченных значений среднегодовых расходов воды рек ($AAWC_i$) и годовых атмосферных осадков (AP_i) бассейна реки Сарысу построены их графики, основанные на реальных временных рядах и с учетом отбрасывания наиболее отклоняющихся точек в процессе определения коэффициента корреляции линейных уравнений с использованием программы Microsoft Excel (рисунки 3-5).

Техника построения графиков зависимости слоя стока рек от атмосферных осадков на территории водосбора бассейна реки основывается на теории корреляции математической статистики, характеризующей тесноту корреляционных связей между этими двумя переменными. Рассмотрение таких связей представляет интерес с точки зрения обоснования принятия или отбраковки точек временных рядов. При этом, следует отметить, что слой атмосферных осадков измеряется более точно, чем слой стока речных бассейнов, что обусловлено физическими причинами. Именно такие точки при анализе графиков связи могут создавать значительный разброс и, возможно, незначительно снижать коэффициент корреляции (рисунки 3-5).

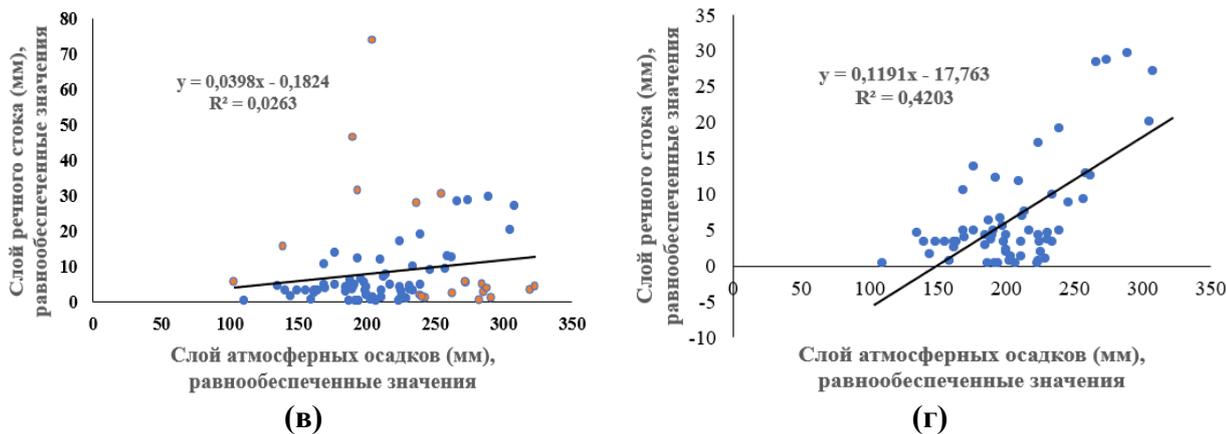


(а)



(б)

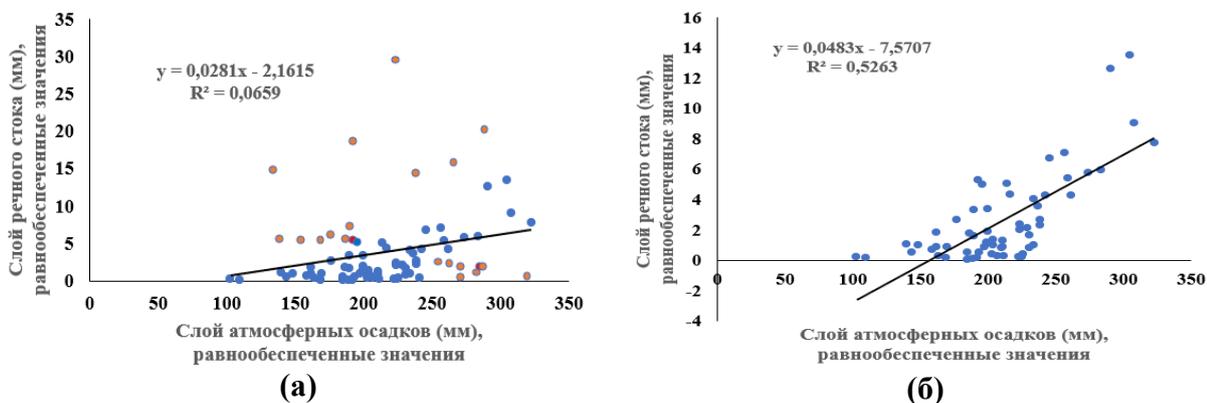
Река Токрау – метеорологическая станция Актогай



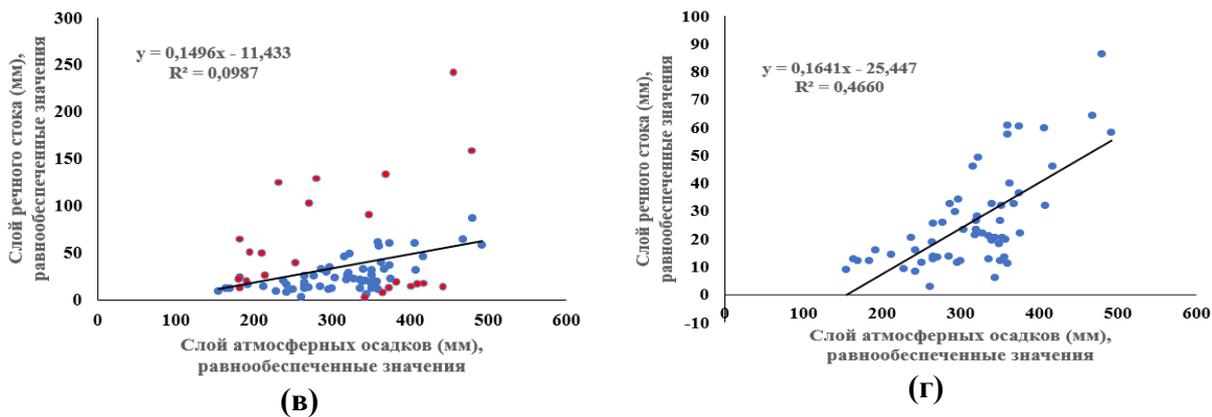
Река Мойынты – метеорологическая станция Агадыр

Рисунок 3. Корреляционная связь слоя стока рек и атмосферных осадков водосбора бассейнов рек Токрау и Мойынты (с красными точками, отброшенными впоследствии, и с учетом этих отброшенных точек): а, б - Река Токрау – метеорологическая станция Актогай; в, г - Река Мойынты – метеорологическая станция Агадыр.

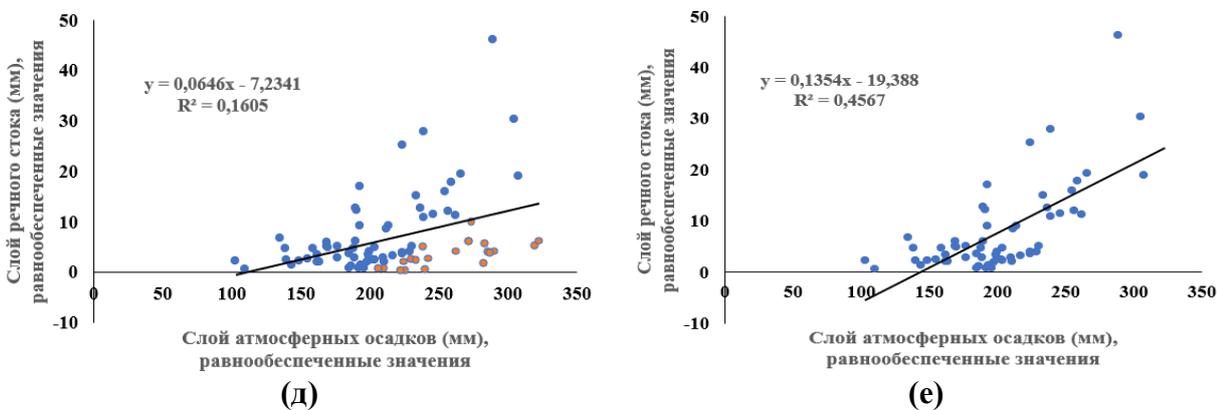
Данные по полученным уравнениям регрессии среднегодового слоя стока рек ($AAWC_i$) и годовых атмосферных осадков (AP_i) в водосборе речных бассейнов Сарысу, их корреляционные параметры, а также результаты, полученные по линейно-корреляционной модели как функции среднегодового слоя стока рек ($AAWC_i$) и годовых атмосферных осадков (AP_i), приведены в таблице 4.



Река Жаман-Сарысу – метеорологическая станция Агадыр



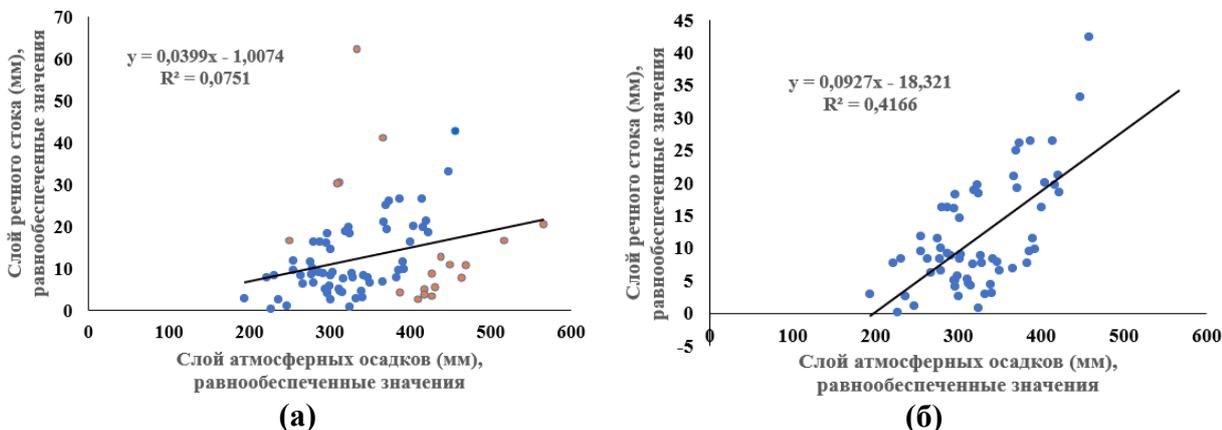
Река Жаксы-Сарысу – метеорологическая станция Аксу-Аюлы



Река Атасу – метеорологическая станция Агадыр

Рисунок 4. Корреляционная связь слоя стока рек и атмосферных осадков водосбора бассейна реки Сарысу (с красными точками, отброшенными впоследствии, и с учетом этих отброшенных точек): а, б - Река Жаман-Сарысу – метеорологическая станция Агадыр; в, г - Река Жаксы-Сарысу – метеорологическая станция Аксу-Аюлы; д, е - Река Атасу – метеорологическая станция Агадыр.

В силу различия в условиях формирования среднегодового слоя стока рек ($AAWC_i$) и годовых атмосферных осадков (AP_i) в водосборе речных бассейнов, наблюдается ситуация, когда максимальному значению атмосферных осадков соответствует максимальное значение стока.



Река Кара-Кенгир – метеорологическая станция Улытау

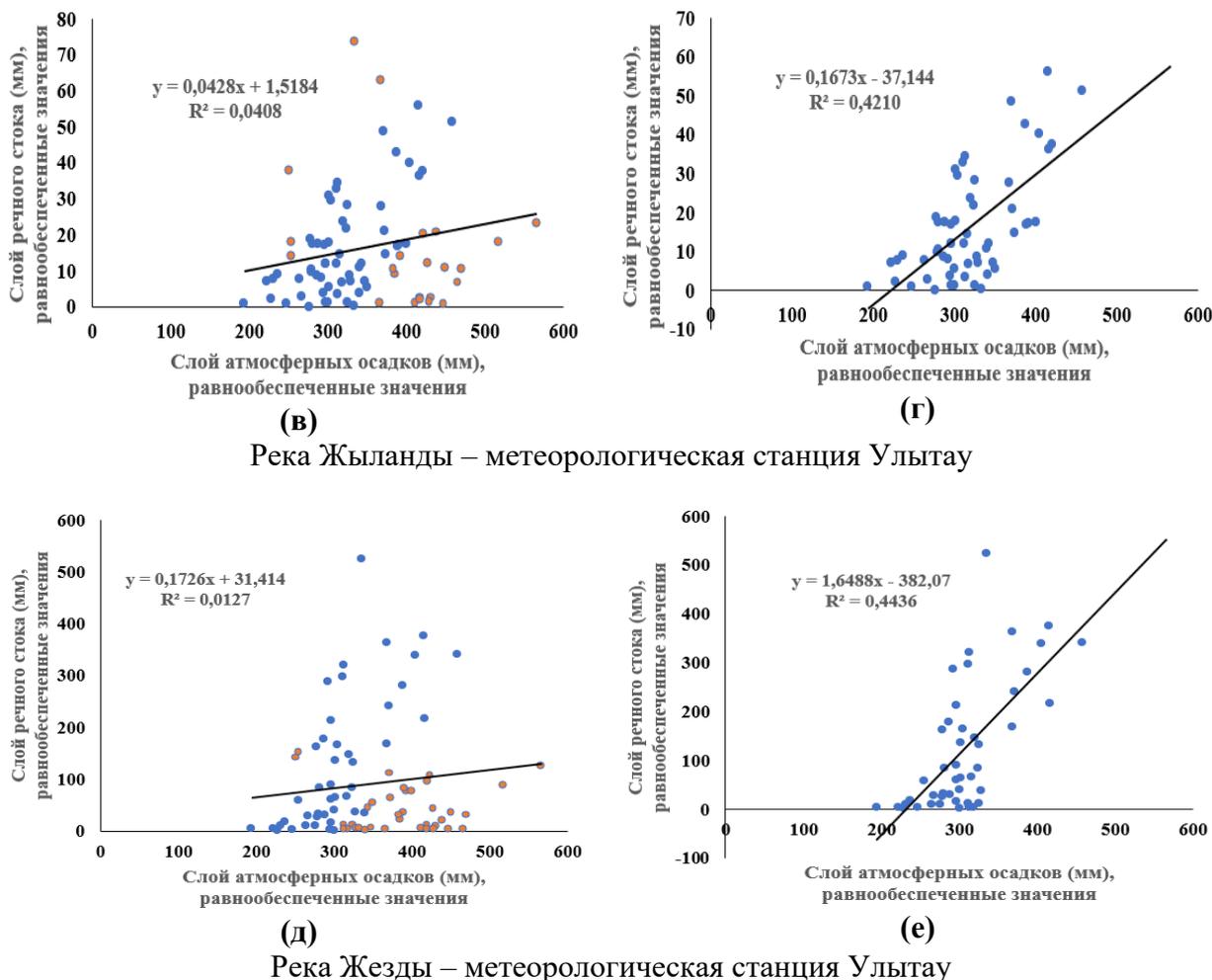


Рисунок 5. Корреляционная связь слоя стока рек и атмосферных осадков водосбора бассейна реки Кара-Кенгир (с красными точками, отброшенными впоследствии, и с учетом этих отброшенных точек): а, б - Река Кара-Кенгир – метеорологическая станция Улытау; в, г - Река Жыланды – метеорологическая станция Улытау; д, е - Река Жезды – метеорологическая станция Улытау.

При этом в нормативных документах СП 33-101-2003 «Определение основных гидрологических характеристик» указывается «...при отсутствии тесной связи необходимо на этом же графике нанести точки равнообеспеченных значений временных рядов обоих переменных...» (Рождественский и др., 1984), базирующихся на ранжировании временного ряда в убывающем порядке (рисунки 2-4), что обеспечивает достаточно высокий коэффициент корреляции, который использован при анализе и оценке математических и физических признаков зависимости слоя стока рек от слоя атмосферных осадков в водосборе бассейна реки Сарысу.

Анализ и оценка формирования поверхностных водных ресурсов, основанных на преобразовании атмосферных осадков (AP_i), выпадающих на водосбор, в речной сток (RF_i), отличающегося от величины атмосферных осадков величиной потерь при их трансформации ($CIAP_i$), выключающего суммарное испарение (TE_i) и изменение бассейновых влагозапасов (BWR_i) почвенного покрова, основываются на трехчленном уравнении водного баланса речных бассейнов:

$$RF_i = AP_i - CIAP_i = AP_i - (TE_i + BWR_i);$$

$$CIAP_i = 0, TE_i = 0; BWR_i = 0; PRF_i = AP_i, \tag{5}$$

где PRF_i - потенциально-возможный речной сток, при $CIAP_i = 0$; $TE_i = 0$; $BWR_i = 0$, равный слою годового атмосферного осадка (AP_i).

Таблица 4. Сведения о корреляционных параметрах уравнения водного баланса рек в водосборе реки Сарысу

Река пункт – наименование метеостанции	Вид ранжирования уравнения	Уравнение регрессии	Индекс детерминации (R^2)
Жаман-Сарысу-Агадыр	до	$RF_i = 0,0281 \cdot AP_i - 2,1615$	0,0659
	после	$RF_i = 0,0483 \cdot AP_i - 7,5707$	0,5263
Жаксы-Сарысу-Аксу-Аюлы	до	$RF_i = 0,1496 \cdot AP_i - 11,4330$	0,0987
	после	$RF_i = 0,1641 \cdot AP_i - 25,4470$	0,4460
Атасу- Агадыр	до	$RF_i = 0,0646 \cdot AP_i - 7,2341$	0,1605
	после	$RF_i = 0,1354 \cdot AP_i - 19,388$	0,4567
Кара-Кенгир-Улытау	до	$RF_i = 0,0399 \cdot AP_i - 1,0074$	0,0751
	после	$RF_i = 0,0927 \cdot AP_i - 18,3210$	0,4166
Жыланды - Улытау	до	$RF_i = 0,0428 \cdot AP_i + 1,5184$	0,0408
	после	$RF_i = 0,1673 \cdot AP_i - 37,1440$	0,4210
Жезды - Улытау	до	$RF_i = 0,1726 \cdot AP_i + 31,4140$	0,0127
	после	$RF_i = 1,6488 \cdot AP_i - 382,0700$	0,4436
Токрау - Актогай	до	$RF_i = 0,1031 \cdot AP_i - 0,8749$	0,1406
	после	$RF_i = 0,1894 \cdot AP_i - 23,3400$	0,4220
Мойынты - Агадыр	до	$RF_i = 0,0398 \cdot AP_i - 0,1824$	0,0263
	после	$RF_i = 0,1191 \cdot AP_i - 17,7630$	0,4203

При этом, согласно философскому подходу Иофина, З.К. (2013), линейно-корреляционная модель водного баланса, полученная в виде линейного корреляционного уравнения с использованием временных рядов годового стока (RF_i) и годовых атмосферных осадков (AP_i), является одной из разновидностью уравнения водного баланса: $RF_i = k \cdot AP_i - b$. Если, теоретически предположить, что коэффициент регрессии (k) в линейно-корреляционном уравнении равен единице, то есть слой выпадающих атмосферных осадков был бы равен слою речного стока, тогда линейно-корреляционное уравнение превращается в трехчленное уравнение водного баланса:

$$RR_i = AP_i - b \rightarrow b = CIAP_i \rightarrow CIAP_i = 0 \rightarrow PRF_i = AP_i. \tag{6}$$

Используя временные ряды годовых суммарных атмосферных осадков (AP_i) и годового стока (RF_i) Жаксы-Сарысу, обратимся к графическому изображению линейно-корреляционного уравнения, характеризующего зависимость речного стока (RF_i) от атмосферных осадков (AP_i), где можно выделить на нем генетические составляющие водного баланса речных бассейнов (рисунок 6).

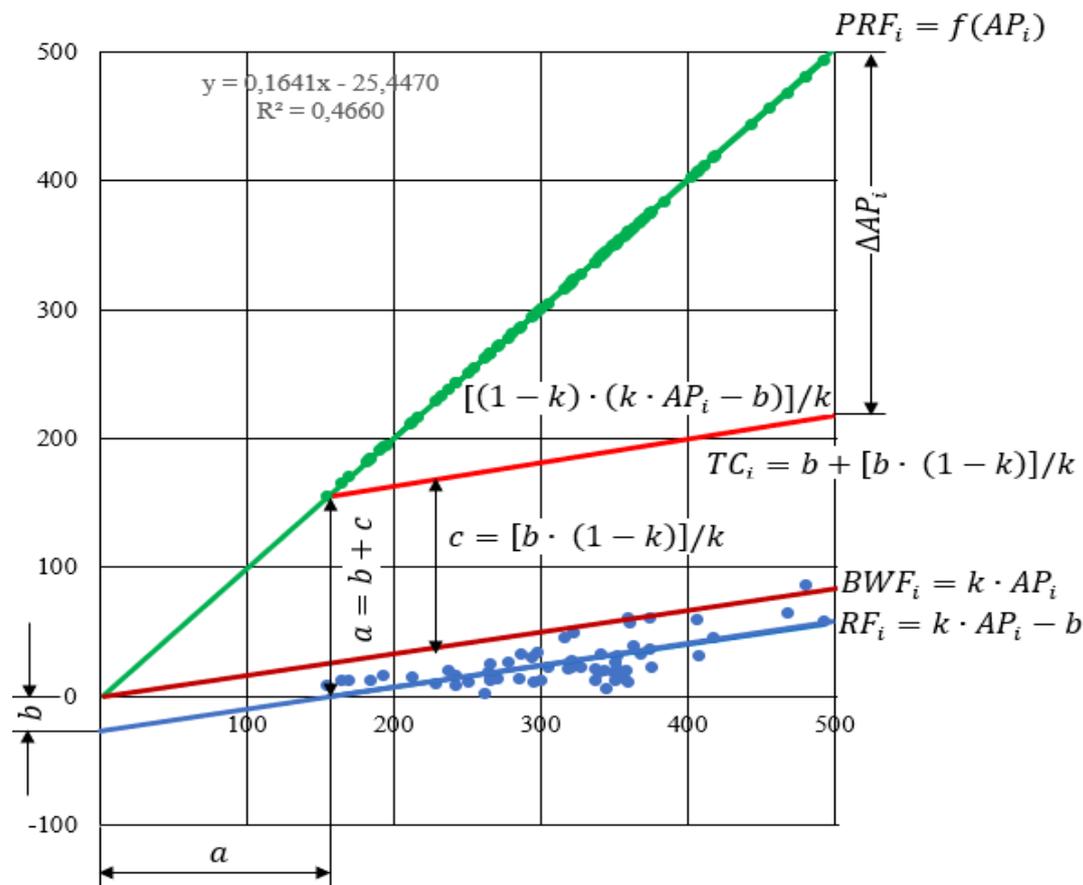


Рисунок 6. Графическое изображение элементов водного баланса реки Жаксы- Сарысу

При этом, слой речного стока (RF_i) в речных бассейнах появится, когда годовые атмосферные осадки (AP_i) будут больше суммарного испарения (TE_i), включающего испарение атмосферных осадков в процессе водообразования (E_i) и влагозапасов почвенного покрова по испарению (BWR_i), то есть $AP_i > (E_i + BWR_i) \rightarrow AP_i > TE_i$. Следовательно, речной сток (RF_i) начинается с некоторым запаздыванием по отношению к началу атмосферных осадков до аккумуляции влагозапасов почвенного покрова по испарению (BWR_i) и испарению атмосферных осадков в процессе водообразования (E_i), тогда из уравнения водного баланса $RF_i = k \cdot AP_i - b$ следует, что параметр b может характеризовать аккумуляцию влагозапасов почвенного покрова по испарению (BWR_i).

При этом, отсекающаяся наклонная линия уравнения водного баланса $RF_i = k \cdot AP_i - b$ на оси абсцисс, на графике (рисунок 5) обозначим буквой α , тогда, во-первых, отношение b/α , представляет тангенс угла наклона $tg\alpha = b/\alpha$, равный коэффициенту регрессии уравнения (k) и, во-вторых, b является частью α , то есть $\alpha = b + c$, характеризующий влагозапасы почвенного покрова по испарению ($BWR_i = b = k \cdot \alpha$), формирующиеся в процессе водообразования атмосферных осадков (AP_i):

$$b = k \cdot AP_i - RF_i \rightarrow b = k \cdot \alpha \rightarrow k \cdot \alpha = k \cdot AP_i - RF_i; \quad (7)$$

$$\alpha = (k \cdot AP_i - RF_i)/k. \quad (8)$$

$$c = E_i = [(k \cdot AP_i - RF_i)/k] - b, \quad (9)$$

где $c = E_i$ - испарение атмосферных осадков в процессе водообразования; $\alpha = TE_i = E_i + BWR_i$ - суммарное испарение, включающее испарение атмосферных осадков в процессе водообразования (E_i) и влагозапасов почвенного покрова по испарению (BWR_i).

На основе графического изображения элементов водного баланса речных бассейнов введем дополнительное обозначение (рисунок 6):

$$AP_i - k \cdot AP_i = d; \quad (10)$$

$$\alpha - b = c. \quad (11)$$

Определяем разницу $d - c$, на основе уравнения $AP_i - k \cdot AP_i$ и $(k \cdot AP_i - RF_i)/k$ и после несложных преобразований получаем:

$$\begin{aligned} d - c &= AP_i - k \cdot AP_i - \alpha + b = AP_i - k \cdot AP_i + k \cdot \alpha - \alpha = \\ &= AP_i - k \cdot AP_i + k \cdot (k \cdot AP_i - RF_i)/k - (k \cdot AP_i + RF_i)/k = \\ &= AP_i - k \cdot AP_i + k \cdot AP_i - RF_i - (k \cdot AP_i + RF_i)/k = \\ &= AP_i - RF_i - (k \cdot AP_i + RF_i)/k = (k \cdot AP - k \cdot RF_i - k \cdot AP_i + RF_i)/k = \\ &= (RF_i - k \cdot RF_i)/k = RF_i(1 - k)/k. \end{aligned} \quad (12)$$

Если $d - c$ равно $RF_i(1 - k)/k$, тогда $d - c = AP_i - k \cdot AP_i - \alpha + b$ принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} AP_i - k \cdot AP_i - \alpha + b &= RF_i(1 - k)/k \rightarrow \\ \rightarrow \alpha &= b + [AP_i - k \cdot AP_i - RF_i(1 - k)/k] \rightarrow \\ \rightarrow \alpha &= b + \{[AP_i(1 - k) - RF_i(1 - k)]/k\}. \end{aligned} \quad (13)$$

При этом $\{[AP_i(1 - k) - RF_i(1 - k)]/k\}$ условно характеризует испарение атмосферных осадков в процессе водообразования, который после несложных преобразований примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \{[AP_i(1 - k) - RF_i(1 - k)]/k\} &\rightarrow b + [(1 - k) \cdot (k \cdot AP_i - RF_i)]/k \rightarrow \\ &\rightarrow [b \cdot (1 - k)]/k; \end{aligned} \quad (14)$$

Следовательно, уравнение (13) с учетом уравнения (14) примет следующий вид:

$$\alpha = b + [b \cdot (1 - k)]/k = b + c. \quad (15)$$

Таким образом, уравнение $\alpha = b + [b \cdot (1 - k)]/k = b + c$, характеризует суммарное испарение (TE_i), формирующееся из аккумуляции влагозапасов почвенного покрова по испарению (BWR_i) и испарению атмосферных осадков в процессе водообразования (E_i).

На основе приведенного методологического подхода оценки элементов водного баланса речных бассейнов, основанного на линейно-корреляционном уравнении, которое характеризует зависимость среднегодовых слоев речного стока от атмосферных осадков (рисунки 5), можно сделать следующие выводы:

- $RF_i = k \cdot AP_i - b$, при $k = 1$ и $b = 0$, характеризует идеальные условия водного баланса, при которых $RF_i = AP_i$. В таких условиях слой речного стока может быть равен слою атмосферных осадков, выпадающих на водосборе, что соответствует потенциально возможному слою речного стока (PRF_i);

- $RF_i = k \cdot AP_i - b$, при $k \leq 1$ и наличии свободного члена, отражает изменение слоя речного стока в зависимости от слоя атмосферных осадков, выпадающих на водосборе, в реальных условиях;

- $b_i = k \cdot AP_i - RF_i$, является функцией влагозапасов почвенного покрова по испарению (BWR_i), которые формируются в результате аккумуляции выпадающих на водосборе слоя атмосферных осадков. В условиях пограничной зоны пустынных и степных зон Центрального Казахстана, где годовые атмосферные осадки в 10-15 раз меньше, чем испаряемость, параметр b_i может быть принят за свободный член уравнения водного баланса речных бассейнов;

- $c = [b \cdot (1 - k)]/k$, где коэффициент регрессии в зависимости от слоя речного стока от годовых атмосферных осадков по математическим признакам и физической сущности, отражает испарение атмосферных осадков в процессе водообразования (E_i), то есть $E_i = [b \cdot (1 - k)]/k$;

- $\alpha = b + c = b + [b \cdot (1 - k)]/k$, является суммарным испарением (TE_i), формирующимся из аккумуляции влагозапасов почвенного покрова по испарению (BWR_i) и испарению атмосферных осадков в процессе водообразования (E_i);

$$\begin{aligned} - \Delta AP_i &= AP_i - (RF_i + BWR_i + E_i) = AP_i - [(k \cdot AP_i - b) + b + c] = \\ &= AP_i - (k \cdot AP_i - b + b + [b \cdot (1 - k)]/k) = AP_i - k \cdot AP_i - b \cdot (1 - k)/k = \\ &= AP_i \cdot (1 - k) - b \cdot (1 - k)/k = [k \cdot AP_i \cdot (1 - k) - b \cdot (1 - k)]/k = \end{aligned}$$

= $[(1 - k) \cdot (k \cdot AP_i - b)]/k$ - совокупность паводкового стока, формирующегося в разнообразном сочетании природных (климатических, геоморфологических, почвенных, геологических) условий и являющимся значительной частью годового стока, который согласно генетической теории стока, включает подвешенный, подпертый и внутрипочвенный склоновый стоки, а также объем воды в замкнутых понижениях.

Таким образом, коэффициент регрессии линейно-корреляционного уравнения, характеризующий зависимость среднегодовых слоев речного стока от атмосферных осадков, позволяет определить элементы водного баланса речных бассейнов, включая слой речного стока, влагозапасы почвенного покрова по испарению, испарение атмосферных осадков в процессе водообразования и паводкового стока, формирующегося в результате аккумуляции атмосферных осадков на водосборной территории.

4. Обсуждение

Анализ и оценка различных видов гидрологических моделей, используемых для управления водными ресурсами в разных регионах мира, показали, что они основываются на генетической теории стока. Это позволяет определить множество водно-балансовых параметров с использованием линейно-корреляционной модели водного баланса, которая включает соответствующее уравнение.

Применяемые модели характеризуются весьма различными подходами к описанию гидрологических процессов в речном бассейне. При этом показано, что фундаментальным ядром разработанных гидрологических моделей является уравнение водного баланса, что позволяет совершенствовать их структурные элементы на основе научных представлений о механизмах формирования стока и материалистической теории научного познания.

При этом полученные параметры моделей и элементы водного баланса бассейна реки Сарысу с использованием методов наименьших прямоугольников (равнообеспеченных значений), удовлетворительно согласуются с общими концепциями формирования стока, которые в исследовательской перспективе могут пояснить использованные основные предположения (гипотезы), повысить обоснованность и сделать результаты более физически обоснованными.

5. Заключение

Ретроспективный анализ и оценка на основе использования многолетних данных о среднегодовом расходе воды рек Жаман-Сарысу, Жаксы-Сарысу, Атасу, Кара-Кенгир, Жыланды, Жезды, Токрау и Моинты, а также годовых атмосферных осадков метеорологических станций Агадыр, Аксу-Аюлы, Актогай, Атасу и Улытау, расположенных в зонах формирования стока рек бассейна реки Сарысу, позволили установить реакцию речных водосборов на выпадающие атмосферные осадки:

- анализ и оценка изменчивости и взаимосвязанности стока рек и атмосферных осадков бассейна реки Сарысу с использованием разностных интегральных кривых за рассматриваемый период 1940-2021 годы показали, что их конфигурация в целом носит синхронный характер и, в том числе, выявлены кратковременные циклы, свойственные отдельным фазам подъема и спада, которые могут рассматриваться как один из этапов изучения их интегральных и динамических характеристик с целью выявления тенденций и направленности изменений этого процесса;

- на основе созданной базы временных рядов гидрологического стока рек и атмосферных осадков в бассейне реки Сарысу с использованием теории равнообеспеченных величин переменных была получена система линейно-корреляционных уравнений, отражающих их функциональную зависимость от коэффициента регрессии. Эти уравнения позволяют смоделировать прогноз элементов водного баланса речных бассейнов на основе массива данных гидрометеорологических наблюдений;

- на основе системы линейно-корреляционного уравнения, характеризующего связь слоя гидрологического стока рек со слоем годовых атмосферных осадков бассейна реки Сарысу с использованием методов наименьших прямоугольников (равнообеспеченных значений), была получена математическая модель потенциально-возможного слоя речного стока (PRF_i), слоя речного стока (RF_i), влагозапасов почвенного покрова по испарению (BWR_i), испарения атмосферных осадков в процессе водообразования (E_i), суммарного испарения (TE_i) и паводкового стока (ΔAP_i). Эти модели позволяют провести анализ закономерностей сопряженных изменений элементов водного баланса, а в дальнейшем разработать имитационную модель речного бассейна.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация, Ж.М. и Г.Ә.; методология, Ж.М.; программное обеспечение, К.М.; валидация, Г.Ә., К.А. и Н.Т.; формальный анализ, Г.С.; исследование, К.М.; ресурсы, К.А.; курирование данных, Н.Т.; написание - подготовка оригинального черновика, Ж.М.; написание - рецензирование и редактирование, Г.Ә.; визуализация, Г.С.; руководство, Г.Ә.; администрирование проекта, Г.Ә. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторах

Мустафаев Жумахан Сулейменович – доктор технических наук, профессор, АО «Институт географии и водной безопасности», пр. Сейфуллина, 458/1, Алматы, Казахстан, 050000; z-mustafa@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2425-8148>

Адилбектеги Гульмира Адилбекқызы – кандидат географических наук, ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; adilbektegi_ga@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1521-0145>

Мустафаев Канат Жумаханович – кандидат экономических наук, MBA Finance Grenoble Business school, ТОО «GENC KZ CONSTRUCTION», ул. Клочкова, дом 89, кв. 33, Алматы, Казахстан, 050008; kmustafaev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1480-3248>

Абдешев Куаныш Бакытжанович - доктор PhD, ассоциированный профессор, Южно-Казахстанский государственный университет имени М. Ауезова, проспект Тауке хан, 5, Шымкент, Казахстан, 160012; abdeshev.kuanysh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5326-1154>

Саспугаева Гулнур Ержановна - доктор PhD, ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; gulnur_erzhanovna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3223-3602>

Турсынбаев Нуржан Аманжолович - доктор PhD, ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; nurANT_78@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5436-5708>

9. Финансирование: Нет внешнего финансирования.

10. Благодарности: отсутствуют.

11. Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Список литературы

1. Akhmedova, N. R., & Naumov, N. R. (2023). Analiz ryadov godovykh summ atmosferykh osadkov meteostantsii Kaliningradskoi oblasti s uchetom korrektyrovki pokazanii osadkometerov [Analysis of Annual Atmospheric Precipitation Series at Kaliningrad Region Meteorological Stations with Adjustment of Precipitation Gauge Readings]. *Vestnik Udmurtskogo Universiteta, seriya biologiya. Nauka o zemle* [Bulletin of Udmurt University, Series Biology. Earth Sciences], 33(3), 299–231.
2. Alekseev, G. A. (1948). Dinamika infiltratsii dozhdevoi vody v pochvu [Dynamics of Rainwater Infiltration into Soil]. *Trudy GGI*, (6), 43–72.
3. Al-Lafta, H. S., Al-Tawash, B. S., & Al-Baldawi, B. A. (2013). Applying the «abcd» monthly water balance model for some regions in the United States. *Advances in Physics Theories and Applications*, 25, 36–47.
4. Alemaw, B. F. (2006). A hybrid atmospheric and terrestrial water balance model: A GIS-based approach for large drainage basins. *Internal Research Report*, University of Botswana.
5. Befani, A. N. (1957). Puti geneticheskogo opredeleniya normy stoka [Methods of Genetic Determination of Runoff Norms]. *Nauchnyi ezhegodnik OGU* [Scientific Yearbook of OGU], 17–23.
6. Belete, M., Deng, J., Zhou, M., Wang, K., You, S., Hong, Y., & Weston, M. (2018). A new drought monitoring index for a humid region: Case study of Oklahoma in the southern United States. *Water*, 10(4), 473. <https://doi.org/10.3390/w10040473>
7. Bhattacharya, T., Aggarwal, S. P., & Garg, V. (2013). Estimation of water balance components of Chambal River basin using a macroscale hydrology model. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(2), 1–7. ISSN 2250-3153.
8. Dadhwal, V. K., Aggarwal, S. P., & Mishra, N. (2010). Hydrological simulation of Mahanadi river basin and impact of land use/land cover change on surface runoff using a macro scale hydrological model. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(7B), 165-170.
9. Estrada, L., Garcia, X., Saló-Grau, J., Marcé, R., Munné, A., & Acuña, V. (2024). Spatio-temporal patterns and trends of streamflow in water-scarce Mediterranean basins. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(24), 5353–5373. <https://doi.org/10.5194/hess-28-5353-2024>
10. Gosudarstvennyi vodnyi kadastr [State Water Cadastre]. (1938–1989). *Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod, Respubliki Kazakhstan* [Annual Data on the Regime and Resources of Surface Waters, Republic of Kazakhstan] (Vol. V, Iss. 4: Basseiny rek ozera Balkhash i bestochnykh raionov Tsentralnogo Kazakhstana [Basins of the

- Balkhash Lake Rivers and Closed Drainage Areas of Central Kazakhstan]). Obninsk: VNIIGMI-MCD.
11. Gosudarstvennyi vodnyi kadastr [State Water Cadastre]. (1989–2000). *Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod, Respubliki Kazakhstan* [Annual Data on the Regime and Resources of Surface Waters, Republic of Kazakhstan] (Vol. V, Iss. 4: Basseiny rek ozera Balkhash i bestochnykh raionov Tsentralnogo Kazakhstana [Basins of the Balkhash Lake Rivers and Closed Drainage Areas of Central Kazakhstan]). Almaty.
 12. Gosudarstvennyi vodnyi kadastr Respubliki Kazakhstan [State Water Cadastre of the Republic of Kazakhstan]. (2003–2023). *Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod rek i kanalov* [Annual Data on the Regime and Resources of Surface Waters of Rivers and Canals] (Part 1, Iss. 8: Basseiny rek Nura i Sarysu [Basins of the Nura and Sarysu Rivers]). Almaty.
 13. Harding, B. L. (2024). Annual water balance model of the upper Colorado River basin. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5044547>
 14. Han, X., Zhu, Y., Wang, X., Wang, Y., Shen, T., & Tang, R. (2024). A coupled regional-scale numerical model for hydrological processes and interactions between groundwater and surface water in a controlled drainage district. *Journal of Hydrology*, 643, 132036. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132036>
 15. Iofin, Z. K. (2013). Lineino-korrelyatsionnaya model vodnogo balansa [Linear-Correlation Model of Water Balance]. *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii* [Journal of the University of Water Communications], (II(XVIII)), 20–32.
 16. Ismayylov, G. Kh., & Fedorov, V. M. (2011). Prostranstvenno-vremennye zakonomernosti izmenchivosti godovogo vodnogo balansa reki Volga [Spatiotemporal Patterns of Annual Water Balance Variability in the Volga River]. *Prirodoobustroistvo* [Environmental Engineering], 2, 57–63.
 17. Ismayylova, I. G., & Ratkovich, L. D. (2023). Formirovanie vremennykh ryadov gidrometeorologicheskoi informatsii dlya otsenki izmenchivosti elementov vodnogo balansa [Formation of Hydrometeorological Time Series for Assessing Water Balance Variability]. *Gidrotekhnicheskoe stroitelstvo* [Hydrotechnical Construction], 11, 20–26.
 18. Ismayylova, I. G., Ismayylov, G. Kh., Murashchenkova, N. V., & Perminov, A. V. (2022). Obosnovanie razvitiya gidrologicheskikh protsessov s ispolzovaniem dinamiko-stokhasticheskogo protsessa [Substantiation of Hydrological Process Development Using Dynamic-Stochastic Modeling]. *Prirodoobustroistvo* [Environmental Engineering], 5, 74–82. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2022-5-74-82>
 19. Jin, L., Chen, S., Yang, H., & Zhang, C. (2024). Evaluation and drivers of four evapotranspiration products in the Yellow River Basin. *Remote Sensing*, 16(11), 1829. <https://doi.org/10.3390/rs16111829>
 20. Kadochnikova, E. I., & Varlamova, Yu. A. (2023). *Statisticheskii analiz prostranstvennykh dannykh: uchebnoe posobie* [Statistical Analysis of Spatial Data: A Textbook]. Kazan: Izdatelstvo Kazanskogo universiteta [Kazan University Publishing House].
 21. Keller, R. (1965). *Vody i vodnyi balans sushy* [Water and the Water Balance of Land]. Moscow: Progress.
 22. Koch, M., & Cherie, N. (2013). SWAT-modeling of the impact of future climate change on the hydrology and the water resources in the upper blue Nile river basin, Ethiopia. In *Proceedings of the 6th International Conference on Water Resources and Environment Research* (pp. 428–523). Koblenz, Germany.
 23. Koronkevich, N. I., & Zaitseva, I. S. (2005). Polistrukturnyi analiz vodnogo balansa i vodnykh resursov v basseine Volgi [Multi-Structural Analysis of Water Balance and Water Resources in the Volga Basin]. *Ukrainskii geograficheskii zhurnal* [Ukrainian Geographical Journal], (2), 17–22.

24. Kudelin, B. I. (1960). *Printsipy regionalnoi otsenki estestvennykh resursov podzemnykh vod* [Principles of Regional Assessment of Natural Groundwater Resources]. Moscow: Izdatelstvo MGU [Moscow State University Press].
- 25 Lvovich, M. I. (1974). *Mirovye vodnye resursy i ikh budushchee* [Global Water Resources and Their Future]. Moscow: Mysl [Thought Publishing House].
26. Marinou, P. G., Feloni, E. G., Tzoraki, O., & Baltas, E. A. (2017). An implementation of a water balance model in the Evrotas basin. *European Water*, 57, 147–154.
27. Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
28. Oldekop, E. M. (1911). *Isparenie s poverkhnosti rechnykh basseinov* [Evaporation from River Basin Surfaces]. Yuryev.
29. Oppokov, E. V. (1935). Osadki, stok i isparenie v basseine Dnepra vyshe Kieva [Precipitation, Runoff, and Evaporation in the Dnieper Basin Above Kiev]. V *Issledovanie rek SSSR* [In Study of the Rivers of the USSR] (Iss. 7, pp. 38–54).
30. Panagopoulos, A., Arampatzis, G., Kuhr, P., Kunkel, R., Tziritis, E., & Wendland, F. (2015). Area-differentiated modeling of water balance in Pinios River basin, Central Greece. *Global NEST Journal*, 17(2), 221–235.
31. Passaretti, S., Mineo, C., Varriale, A., & Cosentino, C. (2022). A technical note on the application of a water budget model at regional scale: A water manager’s approach towards a sustainable water resources management. *Water*, 14(5), 712. <https://doi.org/10.3390/w14050712>
32. Potakhova, I. V. (2015). *Ekonometrika: uchebnoe posobie* [Econometrics: A Textbook]. Tomsk: Fakultet distantsionnogo obucheniya TUSURa [TUSUR Distance Learning Faculty].
33. Querner, E. P., Froebrich, J., Gallart, F., Prat, N., Cazemier, M., & Tzoraki, O. (2016). Simulating stream flow variability in temporary streams using a coupled groundwater-surface water model. *Hydrological Sciences Journal*, 61(1), 146–161.
34. Resursy poverkhnostnykh vod SSSR [Surface Water Resources of the USSR]. (1966). *Tsentralnyi i Yuzhnyi Kazakhstan. Karagandinskaya oblast* [Central and Southern Kazakhstan. Karaganda Region] (Vol. 13, Iss. 1). Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House].
35. Rozhdestvensky, A. V., & Lobanov, A. G. (1984). *Posobie po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Guide for Determining Calculated Hydrological Characteristics]. Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House].
36. Syed, T. H., Webster, P. J., & Famiglietti, J. S. (2014). Assessing variability of evapotranspiration over the Ganga River basin using water balance computations. *Water Resources Research*, 50(4), 2551–2565.
37. Tolika, K., Anagnostopoulou, C., Traboulsi, M., Zaharia, L., Constantin, D. M., Tegoulis, I., & Maheras, P. (2024). Comparative study of the frequencies of atmospheric circulation types at different geopotential levels and their relationship with precipitation in Southern Romania. *Atmosphere*, 15(9), 027. <https://doi.org/10.3390/atmos15091027>
38. Tzoraki, O., Papadoulakis, V., Christodoulou, A., Vozinaki, E., Karalemas, N., Gamvroudis, C., & Nikolaidis, N. P. (2011). Hydrologic modelling of a complex hydrogeologic basin: Evrotas River Basin. In *Advances in the Research of Aquatic Environment* (pp. 179–186). Springer Berlin Heidelberg.
39. Vanderkelen, I., van Lipzig, N. P. M., & Thiery, W. (2018). Modelling the water balance of Lake Victoria (East Africa) - Part 1: Observational analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(22), 5509–5525. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5509-2018>
40. Velikanov, M. A. (1948). *Gidrologiya sushi* [Land Hydrology]. Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House].

41. Voeikov, A. I. (1949). *Klimaty zemnogo shara, v osobennosti Rossii* [Climates of the Globe, Especially Russia]. V *Izbrannye sochineniya* [In Selected Works] (Vol. 1). Moscow-Leningrad.
42. Warszawski, L., Frieler, K., Huber, V., Piontek, F., Serdeczny, O., & Schewe, J. (2013). The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): Project framework. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3228–3232. <https://doi.org/10.1073/pnas.1312330110>

Гидрологиялық және климаттық бақылау деректері негізінде Сарысу өзені бассейнінің су балансының элементтерін модельдеу

Жұмахан Мұстафаев, Гүлмира Әділбектегі, Қанат Мұстафаев, Қуаныш Әбдешев, Гүлнур Саспугаева, Нұржан Тұрсынбаев

Андатпа: Сарысу өзені бассейнінің ағынын қалыптастыру аймағындағы өзен суларын талдау және бағалау үшін салыстырмалы түрде біркелкі орналасқан Ақсу-Аюлы, Ағадыр, Ақтоғай және Ұлытау метеорологиялық станцияларының жылдық жауын-шашыны бойынша ақпаратты пайдалана отырып, Жамансарысу, Жақсы-Сарысу, Атасу, Қара-Кеңгір, Жыланды, Жезді, Қазақ ұсақ шоқыларының аласа тауларының шегінде 1940-2021 жылдар аралығындағы бақылау кезеңінде тоқырау өзендерінің орташа жылдық су шығыстары пайдаланылды. Сарысу өзені бассейнінің гидрологиялық ағынының және жылдық атмосфералық жауын-шашынның жеткілікті ұзақ уақыт қатарларына негізделген талдау және бағалау дифференциалды интегралдық қисықтар әдістерін қолдана отырып, су жинағыштардың жауын-шашынға реакциясының алуан түрлілігіне байланысты циклдік тербелістердің болуын көрсетеді. Олар синхронды сипатта болады және, соның ішінде, көтерілу мен құлдыраудың жекелеген фазаларына тән қысқа мерзімді циклдар анықталды. Гидрологиялық ағынның Сарысу өзені бассейнінің су жинауында түсетін атмосфералық жауын-шашынға тәуелділігін сипаттайтын өзендердің су балансының сызықтық-корреляциялық теңдеуінің параметрлерін статистикалық негізделген бағалау су балансы элементтерінің математикалық модельдерін әзірлеу үшін ғылыми негіз болып табылады. Бұл модельдерге өзен ағынының ықтимал қабаты, булану арқылы жер жамылғысының ылғал қоры, су түзілу процесінде жауын-шашынның булануы, жалпы булану және регрессия коэффициентінің математикалық және физикалық сипаттамаларына негізделген су тасқыны жатады.

Түйін сөздер: су балансының теңдеуі, сызықтық-корреляциялық теңдеу, өзен ағыны, жауын-шашын, регрессия коэффициенті, жалпы булану, жер жамылғысының ылғал қоры.

Modelling of water balance elements in the Sarysu River basin based on hydrological and climatic observation data

Zhumakhan Mustafayev, Gulmira Adilbektegi, Kanat Mustafayev, Kuanysh Abdeshev, Gulnur Saspugayeva, Nurzhan Tursynbayev

Abstract: To analyse and assess water resources in the runoff formation zone of the Sarysu River basin, data on average annual water discharge of the rivers Zhaman-Sarysu, Zhaksy-Sarysu, Atasu, Kara-Kengir, Zhylandy, Zhezdy, and Tokrau were used, as well as information on annual precipitation recorded at meteorological stations Aksu-Ayuly, Agadyr, Aktogay and Ulytau, relatively evenly located within the low mountains of the Kazakh shallow zone, for the period of observations from 1940 to 2021. Analysis and assessment on the basis of sufficiently long time series of hydrological river runoff and annual precipitation of the Sarysu River basin using the methods of difference integral curves show the presence of cyclic fluctuations due to the diversity of catchment response to precipitation, which are synchronous in nature, including short-term cycles characteristic of separate phases of rise and fall. Statistically substantiated estimation of parameters of the linear-correlation equation of the river water balance, which characterises the dependence of hydrological runoff on precipitation falling in the catchment of the Sarysu River basin, serves as a scientific basis for the development of mathematical models of water balance elements. These models include potential-possible layer of river runoff, soil moisture reserves by evaporation, evaporation of atmospheric precipitation in the process of water formation, total evaporation and flood runoff based on mathematical and physical characteristics of the regression coefficient.

Keywords: water balance equation, linear-correlation equation, river runoff, precipitation, regression coefficient, evapotranspiration, soil moisture reserves.