

Ж. С. Мустафаев¹, А. Н. Калмашова²

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

²Магистр, докторант PhD «водные ресурсы и мелиорация»
(Казахский национальный аграрный университет, Алматы, Казахстан)

ЛИНЕЙНО-КОРРЕЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВОДНОГО БАЛАНСА БАССЕЙНА РЕКИ ЕСИЛЬ

Аннотация. На основе генетической теории стока, методов математической статистики и с использованием данных РГП «Казгидромет» по гидрологической станции Долматова, метеорологическим станциям Нур-Султана (Астана), Атбасара, Есиля, Рузаевки, Явленки и Петропавловска, охватывающих 1950–2017 годы, получено линейно-корреляционное уравнение с высоким коэффициентом корреляции на базе программы Microsoft Excel, характеризующее зависимость слоя стока от слоя атмосферных осадков речных бассейнов. Оно позволяет выявить математические и физические признаки, которые представлены в виде графического изображения элементов водного баланса речных бассейнов, которые дают возможность определить потери атмосферных осадков и речного стока: слоя впитывания в процессе водообразования (V_b), слоя впитывания на спаде стока после окончания водообразования (V_o) и слоя впитывания после окончания стока в замкнутых понижениях (V_k).

Ключевые слова: слой речного стока, слой атмосферных осадков, коэффициент регрессии, уравнение регрессии, генетическая теория стока, впитывание в почву, суммарное испарение.

Введение. Речные системы в степной зоне являются важнейшим компонентом природного ландшафта, выполняют важную природообразующую и экологическую функции.

В степных зонах атмосферные осадки, выпадающие на водосборах речного бассейна в естественных условиях, являются единственным источником природных вод зоны активного водообмена, которые определяются на основе генетической теории стока, характеризующих функциональные зависимости слоя стока речных бассейнов от слоя атмосферных осадков. На водосборах речных бассейнов распределение слоя атмосферных осадков по всем расходным статьям водного баланса водосбора речных бассейнов, в том числе на продуктивные запасы влаги на угодьях, питание подземных вод, формирование паводкового стока, речного стока и испарение, требуют не только найти линейно-корреляционное уравнение, а также установить математические и физические признаки этой зависимости для определения элементов водного баланса водосбора речных бассейнов.

Цель исследования. На основе многолетних информационно-аналитических материалов РГП «Казгидромет», характеризующих климатические и гидрологические условия водосбора бассейна реки Есиль, изучить закономерности формирования слоя гидрологического стока в зависимости от слоя атмосферных осадков с использованием линейно-корреляционной модели водного баланса.

Объект исследований. Есиль берет начало из родников в горах Нияз в Карагандинской области (северная окраина Казахского мелкосопочника). Река протекает по территории Республики Казахстан в пределах Акмолинской (1027 км) и Северо-Казахстанской областей (690 км), далее на протяжении 667 км пересекает Тюменскую и часть Омской области Российской Федерации и впадает в реку Ертыс на северо-западе Омской области у села Усть-Ишим на 1016 км от устья. Общая площадь водосбора бассейна реки Есиль 177 тыс. км², на территорию Республики Казахстан приходится 143,0 тыс. км², то есть около 73 % длины реки и 80 % площади, в пределах которой формируется около 70 % руслового стока [1-6].

Материалы и методы исследований. Исследования проводились на основе информационно-аналитических материалов РГП «Казгидромет» по метеорологическим и гидрологическим станциям, расположенным в различных природно-географических зонах в водосборах бассейна реки Есиль, охватывающих период от 1950 до 2017 г.

В качестве метода исследований рассмотрена корреляционная модель с линейной связью слоя гидрологического стока со слоем атмосферных осадков, которую сформулировал З. К. Иофин [7, 8]

на основе генетической теории стока А. Н. Бефани [9], где потери атмосферных осадков и речного стока на впитывание в почву состоят из трех составляющих: слоя впитывания в процессе водообразования (V_b), слоя впитывания на спаде стока после окончания водообразования (V_o) и слоя впитывания после окончания стока в замкнутых понижениях (V_k).

Постановка проблемы. Для выявления математических и физических признаков коэффициента регрессии в зависимостях слоя гидрологического стока в водосборах речных бассейнов от слоя атмосферных осадков использованы многолетние информационно-аналитические материалы РГП «Казгидромет» по гидрологической станции Долматова и метеорологическим станциям Нур-Султан (Астана), Атбасар, Есиль, Рузаевка, Явленка и Петропавловск, расположенных в водосборном бассейне реки Есиль.

В бассейне реки Есиль в створе гидрологического поста Долматова продолжительность периодов наблюдений составляет 17 лет, с 2001 по 2017 год. В бассейне реки Нура в створе гидрологического поста Сергипольское взяты наблюдения за 1932–2017 гг. Они приняты в виде аналога для восстановления среднегодового стока реки Есиль. Все расчеты и построение графиков с линейного тренда были произведены в программе Microsoft Excel (рисунок 1).

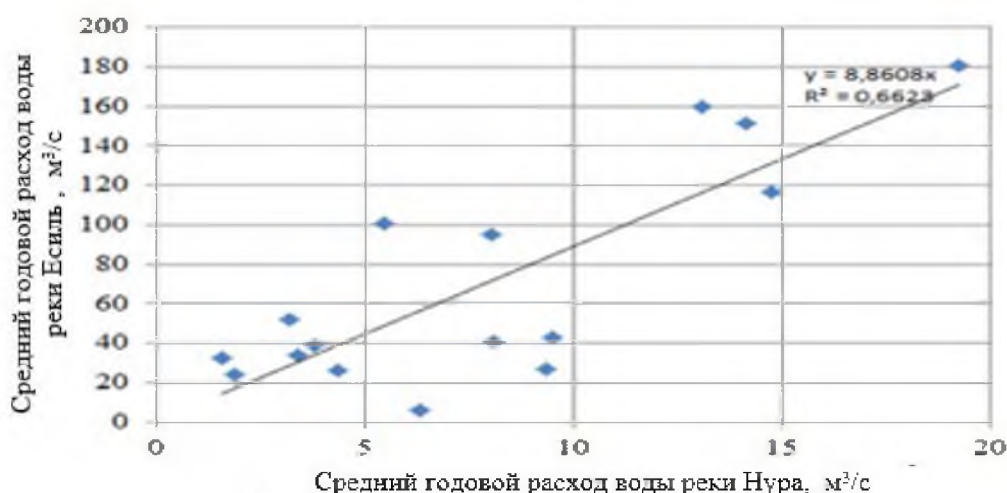


Рисунок 1 – Кривая связи средних годовых расходов воды реки Есиль в створе гидрологического поста Долматова и реки Нуры в створе гидрологического поста Сергипольское

Как видно из рисунка 1, степень зависимости средних годовых расходов воды реки Есиль в створе гидрологического поста Долматова и реки Нуры в створе гидрологического поста Сергипольское достаточно высокая, т.е. $Q_e = 8,8608 \cdot Q_n$, $r = 0,80$, где Q_e – среднегодовые расходы воды реки Есиль в створе гидрологического поста Долматова, м³/с; Q_n – среднегодовые расходы воды реки Нуры в створе гидрологического поста Сергипольское, м³/с; r – коэффициент корреляции.

С учетом того, что реки Есиль и Нура расположены в Центральном и Северном Казахстане и имеют одинаковые физико-географические условия, а также достаточно высокой корреляции восстановлены среднегодовые расходы воды реки Есиль (таблица 1).

Для выполнения сравнительного анализа зависимости гидрологического стока водосбора бассейна реки Есиль и атмосферных осадков использованы многолетние данные по атмосферным осадкам метеорологических станций Нур-Султан (Астана), Атбасар, Есиль, Рузаевка, Явленка и

Петропавловск. Среднеарифметические значения определены по формуле $O_c^{op} = \frac{\sum_{i=1}^n O_{ci}}{n}$ (где O_{ci} – годовые атмосферные осадки i -метеорологической станции, мм; n – количество метеорологических станций; O_c^{op} – среднеарифметическое значение годовых атмосферных осадков i -метеорологических станций, мм) и приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Среднегодовые расходы воды реки Есиль в створе гидрологической станции Долматова, м³/с

Год	Расход	Год	Расход	Год	Расход	Год	Расход
1950	62,20	1967	3,72	1984	64,77	2001	43,15
1951	10,72	1968	13,64	1985	87,89	2002	151,57
1952	47,58	1969	41,82	1986	118,72	2003	33,64
1953	29,24	1970	38,45	1987	69,73	2004	53,66
1954	141,76	1971	96,57	1988	133,79	2005	116,37
1955	35,26	1972	58,56	1989	78,23	2006	32,66
1956	9,83	1973	67,69	1990	142,65	2007	194,70
1957	12,76	1974	58,65	1991	128,47	2008	39,00
1958	71,94	1975	80,18	1992	28,62	2009	23,78
1959	75,40	1976	87,71	1993	84,67	2010	40,68
1960	129,36	1977	154,16	1994	94,18	2011	51,68
1961	59,81	1978	65,12	1995	85,62	2012	26,00
1962	71,23	1979	92,14	1996	60,25	2013	26,99
1963	7,53	1980	63,08	1997	75,74	2014	27,00
1964	32,60	1981	59,27	1998	23,46	2015	90,69
1965	21,44	1982	67,96	1999	19,34	2016	100,5
1966	86,92	1983	86,03	2000	17,76	2017	145,54

Таблица 2 – Среднегодовые атмосферные осадки по метеорологическим станциям, расположенным в водосборах бассейна реки Есиль, мм

Год	Метеорологические станции						O_c^{op}
	Нур-Султан	Атбасар	Есиль	Рузаевка	Явленка	Петропавловск	
1	2	3	4	5	6	7	8
1950	209	230	225	391	441	438	322,3
1951	128	129	135	227	262	204	180,8
1952	263	217	205	228	298	280	248,5
1953	340	286	250	317	403	427	337,2
1954	323	242	236	358	336	335	305,0
1955	174	134	177	248	209	239	196,8
1956	263	232	239	353	302	362	291,8
1957	323	271	216	271	273	310	277,3
1958	399	239	301	292	268	304	300,5
1959	301	283	245	250	320	341	290,0
1960	397	379	285	305	359	415	356,7
1961	368	267	260	333	390	295	318,8
1962	395	319	300	315	290	219	306,3
1963	329	384	325	341	298	331	334,7
1964	346	379	335	406	471	326	377,2
1965	256	229	210	255	248	171	228,2
1966	277	311	257	434	380	245	317,3
1967	333	304	256	280	249	280	283,7
1968	311	164	182	366	338	356	286,2
1969	418	412	366	416	451	401	410,7
1970	288	285	173	409	295	398	308,0
1971	319	308	296	411	291	385	335,0
1972	433	287	256	334	248	325	313,8
1973	319	303	304	358	340	343	327,8
1974	297	255	227	308	268	252	267,8
1975	230	318	179	267	193	221	234,7

Окончание таблицы 2							
1	2	3	4	5	6	7	8
1976	252	189	249	335	320	264	268,2
1977	285	346	316	437	500	405	381,5
1978	303	320	192	259	258	309	273,5
1979	320	353	288	441	472	473	391,2
1980	326	269	202	364	326	241	288,0
1981	276	300	292	274	225	311	279,7
1982	278	309	274	346	314	456	329,5
1983	308	320	224	314	383	310	309,8
1984	315	287	228	326	373	279	301,3
1985	324	338	238	386	425	310	336,8
1986	279	279	245	390	377	339	318,2
1987	387	369	236	419	424	408	373,8
1988	255	282	193	408	362	272	295,3
1989	314	322	281	393	286	316	318,7
1990	407	434	342	448	480	403	419,0
1991	233	249	197	256	499	257	281,8
1992	336	315	245	384	232	281	298,8
1993	342	411	383	470	343	479	404,7
1994	385	348	297	594	428	444	416,0
1995	362	336	215	351	377	272	318,8
1996	292	302	239	387	325	298	307,2
1997	227	242	177	304	346	283	263,2
1998	235	231	110	300	385	276	256,2
1999	322	367	318	339	365	386	349,5
2000	321	274	314	372	355	290	319,5
2001	372	453	401	569	476	444	452,5
2002	377	303	220	419	447	352	353,0
2003	316	307	334	289	250	369	310,8
2004	361	237	242	390	407	305	338,7
2005	290	329	256	321	421	414	338,5
2006	343	320	319	423	456	368	371,5
2007	304	421	276	321	362	408	348,7
2008	363	512	247	375	411	292	366,7
2009	347	294	259	396	351	387	339,0
2010	251	186	193	297	233	227	231,2
2011	319	288	464	722	511	426	455,0
2012	301	258	198	376	298	315	291,0
2013	494	511	317	424	490	500	456,0
2014	351	296	284	398	325	377	338,5
2015	396	404	296	556	390	431	412,2
2016	418	355	449	414	402	500	423,0
2017	256	283	233	317	274	374	289,5

На основе прогнозирования и оценки статистических характеристик гидрологического стока [10] с использованием многолетних информационно-аналитических материалов по среднегодовым расходам воды гидрологической станции Долматова (см. таблицу 1) и среднеарифметических значений атмосферных осадков по метеорологическим станциям (см. таблицу 2), расположенным в водосборах бассейна реки Есиль, определена интегральная разностная кривая $\sum_{i=1}^n (K_i - 1)$ (где K_i – модуль среднегодового расхода и атмосферных осадков) среднегодовых расходов воды и атмосферных осадков, показывающая ход накопленной разности во времени, и построен их совместный график, выполненный с использованием программы Microsoft Excel (рисунок 2).

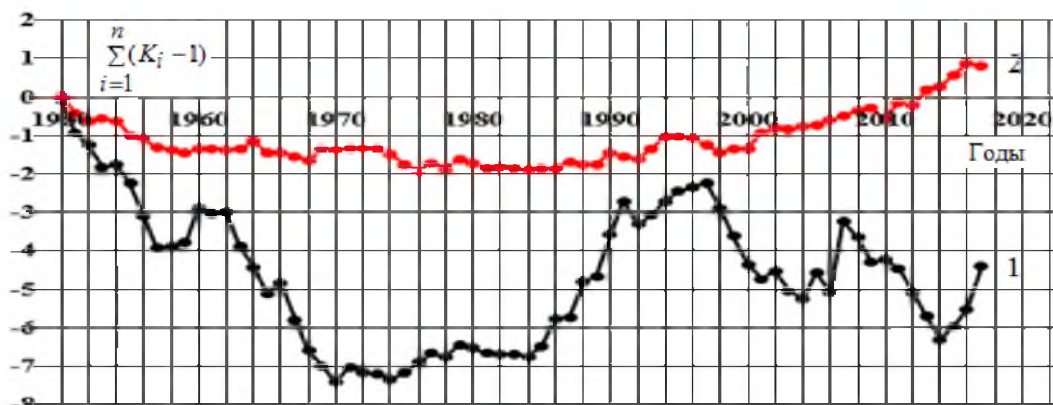


Рисунок 2 – Совместная интегральная разностная кривая среднегодовых расходов реки Есиль в створе гидрологической станции Долматова и среднегодовых атмосферных осадков по метеорологическим станциям, расположенным в бассейне реки (1 – среднегодовые расходы реки; 2 – среднегодовые атмосферные осадки)

Как видно из рисунка 2, интегральная разностная кривая среднегодовых расходов реки Есиль в створе гидрологической станции Долматова и среднегодовых атмосферных осадков по метеорологическим станциям Нур-Султан (Астана), Атбасар, Есиль, Рузаевка, Явленка и Петропавловск, расположенных в бассейне реки, во временном масштабе показывает, что они по существу изменяются параллельно и сохраняют определенную синхронность, присущую рекам степной зоны Северного Казахстана, формирующихся из таяния снежного покрова, холодных и атмосферных осадков в биологически активный период года.

Для получения статистической зависимости в виде линейного уравнения регрессии между среднегодовыми расходами реки Есиль и среднегодовыми атмосферными осадками по метеорологическим станциям Нур-Султан (Астана), Атбасар, Есиль, Рузаевка, Явленка и Петропавловск, расположенным в бассейне реки, построены их графики. В их основе – информационно-аналитические материалы, приведенные в таблицах 1 и 2. Использование методов математической статистики, с исключением грубых погрешностей [11], показывает наличие линейного уравнения регрессии с высоким коэффициентом корреляции. Расчет выполнен с использованием программы Microsoft Excel: $Y = 0,5924 \cdot X + 95,428$.

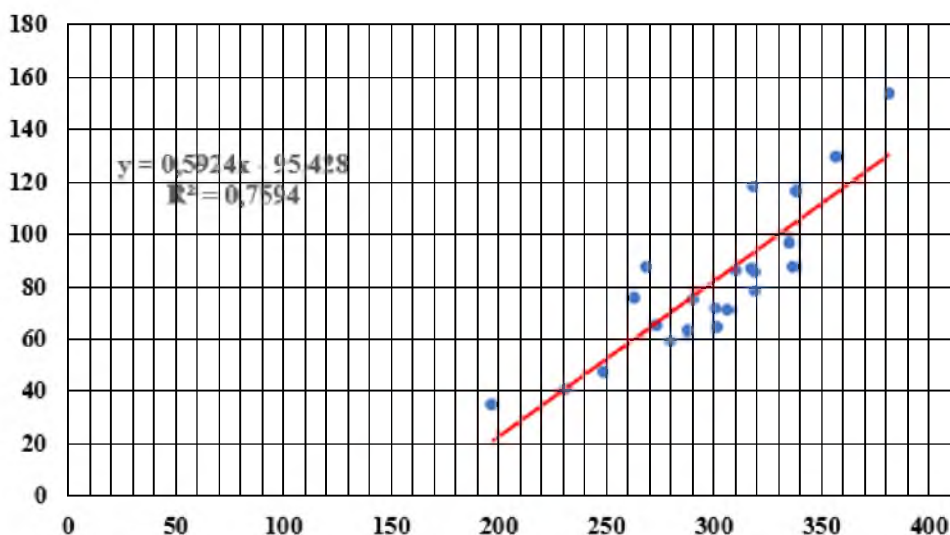


Рисунок 3 – Графическое изображение линейного уравнения регрессии между среднегодовыми расходами реки Есиль (ордината) и среднегодовыми атмосферными осадками (абсцисса) по метеорологическим станциям, расположенным в бассейне реки

Таким образом, наличие статической зависимости в виде линейного уравнения регрессии между среднегодовыми расходами реки Есиль (ордината) и среднегодовыми атмосферными осадками (абсцисса) по метеорологическим станциям, расположенным в бассейне реки, показывает, что, несмотря на то, что между ними существует тесная связь, она полностью не раскрывает причины формирования линейно-корреляционных связей, условно характеризующих водный баланс речных бассейнов. Однако А. Н. Бефани [9] на основе генетической теории стока и З. К. Иофин при теоретическом обосновании линейно-корреляционной модели водного баланса речных бассейнов [7, 8] показали возможность вывести уравнение водного баланса речных бассейнов. Оно представляет собой линейно-корреляционное уравнение с двумя неизвестными параметрами: $Y_4 = k_4 \cdot P + b$ (Y_4 – слой стока речных бассейнов, мм; k_4 – коэффициент регрессии уравнения; P_i – слой атмосферных осадков, выпадающих на водосборы речных бассейнов, мм; b_4 – свободный член уравнений).

Итак, линейно-корреляционное уравнение, характеризующее зависимость среднегодовых расходов воды реки Есиль (ордината) и среднегодовых атмосферных осадков (абсцисса) по метеорологическим станциям, расположенным в бассейне реки, по структуре имеют генетическое сходство: $Y = 0,5924 \cdot X + 95,428$ (где $0,5924 = k$; $95,428 = b$), с высоким коэффициентом корреляции: $r = 0,87$, то есть является одной из модификаций уравнения водного баланса: $Y = O_o - E_o$ и $Y = k \cdot P_i + b$ (где P , Y , E_o – среднемноголетние величины атмосферных осадков, речного стока и суммарного испарения).

Результаты исследования и их обсуждение. Для обеспечения достоверности и надежности функциональную, статистическую и корреляционную зависимость изучаемой случайной величины от других величин, т. е. годового расхода воды реки Есиль от среднегодовых атмосферных осадков по метеорологическим станциям, расположенным в бассейне реки, необходимо привести к одинаковой размерности – параметры годового расхода воды реки Есиль за 1950–2017 гг., выраженные в м³/с, а как слой речного стока (Y_i , мм) с использованием следующего математического выражения (таблица 3):

Таблица 3 – Среднегодовой слой стока (Y_i , мм) реки Есиль в створе гидрологической станции Долматова и значение среднегодовых атмосферных осадков (P_i , мм) по метеорологическим станциям Нур-Султан (Астана), Атбасар, Есиль, Рузаевка, Явленка и Петропавловск, расположенных в бассейне реки

Год	Y_i , мм	P_i , мм	Год	Y_i , мм	P_i , мм	Год	Y_i , мм	P_i , мм
1950	5,88	322,3	1973	6,41	327,8	1996	5,70	307,2
1951	1,05	180,8	1974	5,55	267,8	1997	7,17	263,2
1952	4,51	248,5	1975	7,59	234,7	1998	2,22	256,2
1953	2,77	337,2	1976	8,31	268,2	1999	1,83	349,5
1954	13,42	305,0	1977	14,60	381,5	2000	1,68	319,5
1955	3,34	196,8	1978	6,17	273,5	2001	4,09	452,5
1956	0,93	291,8	1979	8,72	391,2	2002	14,35	353,0
1957	1,21	277,3	1980	5,97	288,0	2003	3,19	310,8
1958	6,81	300,5	1981	5,61	279,7	2004	5,08	338,7
1959	7,14	290,0	1982	6,43	329,5	2005	11,02	338,5
1960	12,25	356,7	1983	8,15	309,8	2006	3,09	371,5
1961	5,66	318,8	1984	6,13	301,3	2007	18,44	348,7
1962	6,74	306,3	1985	8,32	336,8	2008	3,69	366,7
1963	0,71	334,7	1986	11,24	318,2	2009	2,25	339,0
1964	3,09	377,2	1987	6,60	373,8	2010	3,85	231,2
1965	2,03	228,2	1988	12,67	295,3	2011	4,88	455,0
1966	8,23	317,3	1989	7,41	318,7	2012	2,46	291,0
1967	0,34	283,7	1990	13,51	419,0	2013	2,55	456,0
1968	1,29	286,2	1991	12,17	281,8	2014	1,27	338,5
1969	3,96	410,7	1992	2,71	298,8	2015	8,59	412,2
1970	3,64	308,0	1993	8,01	404,7	2016	8,73	423,0
1971	9,15	335,0	1994	8,92	416,0	2017	13,78	289,5
1972	5,42	313,8	1995	8,11	318,8	–	–	–

$$Y_i = \frac{86400 \cdot 365 \cdot 1000 \cdot Q_i}{F \cdot 10^6},$$

где Q_i – годовой расход воды реки, м³/с; F – площадь водосбора бассейна реки, км²; 365 – количество суток в году; 86 400 – количество секунд в сутках; 10^6 – переводное число км² на м²; 10^3 – переводное число м³ на мм.

Таким образом, для выявления математических и физических признаков линейно-корреляционного уравнения с двумя неизвестными, характеризующими зависимость слоя речного стока реки Есиль от среднегодового слоя атмосферных осадков по метеорологическим станциям, расположенным в бассейне реки, построен график с использованием программы Microsoft Excel (рисунок 4), который позволил получить следующее математическое уравнение с высоким коэффициентом корреляции:

$$Y_i = 0,0394 \cdot P_i - 4,7412 \text{ (где } 0,0394 = k; 4,7412 = b, r = 0,89);$$

$$Y = k \cdot P + b.$$

При этом уравнение $Y = k \cdot P + b$, связывающее речной сток с атмосферными осадками, Э. М. Ольдекоп [12], Е. В. Оппокон [13] и М. А. Великанов [14] использовали для определения коэффициента стока:

$$k = \frac{Y - b}{P}.$$

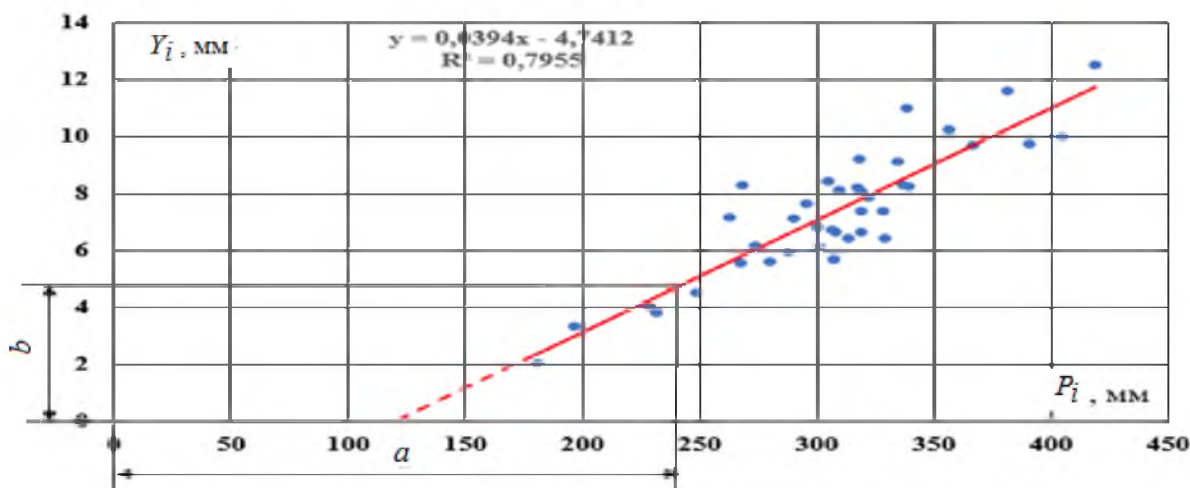


Рисунок 4 – Графическое изображение линейного уравнения регрессии между среднегодовым слоем стока реки Есиль (ордината) (Y_i , мм) и среднегодовым слоем атмосферных осадков (абсцисса) (P_i , мм) по метеорологическим станциям, расположенным в бассейне реки

Как видно из рисунка 4, линейность корреляционной связи слоя стока реки Есиль со среднегодовым слоем атмосферных осадков по метеорологическим станциям, расположенным в бассейне реки, характеризует линия связи на графике. Угловой коэффициент уравнения выражается функцией тангенса: $\text{tg}\alpha = 2 \cdot b/a = k$. Тогда свободный член уравнения $Y = k \cdot P + b$ можно представить в следующем виде: $b = a \cdot \text{tg}\alpha = k \cdot a/2$.

Для определения математических и физических признаков коэффициента регрессии в зависимости слоя стока реки Есиль от среднегодового слоя атмосферных осадков по метеорологическим станциям, расположенным в бассейне реки, на основе линейно-корреляционного уравнения $Y_i = 0,0394 \cdot P_i - 4,7412$ построен график с использованием программы Microsoft Excel (рисунок 5), позволяющий выделить на нем генетические составляющие водного баланса.

Линейно-корреляционное уравнение $Y_i = 0,0394 \cdot P_i - 4,7412$, характеризующее зависимость слоя стока реки Есиль от среднегодового слоя атмосферных осадков по метеорологическим стан-

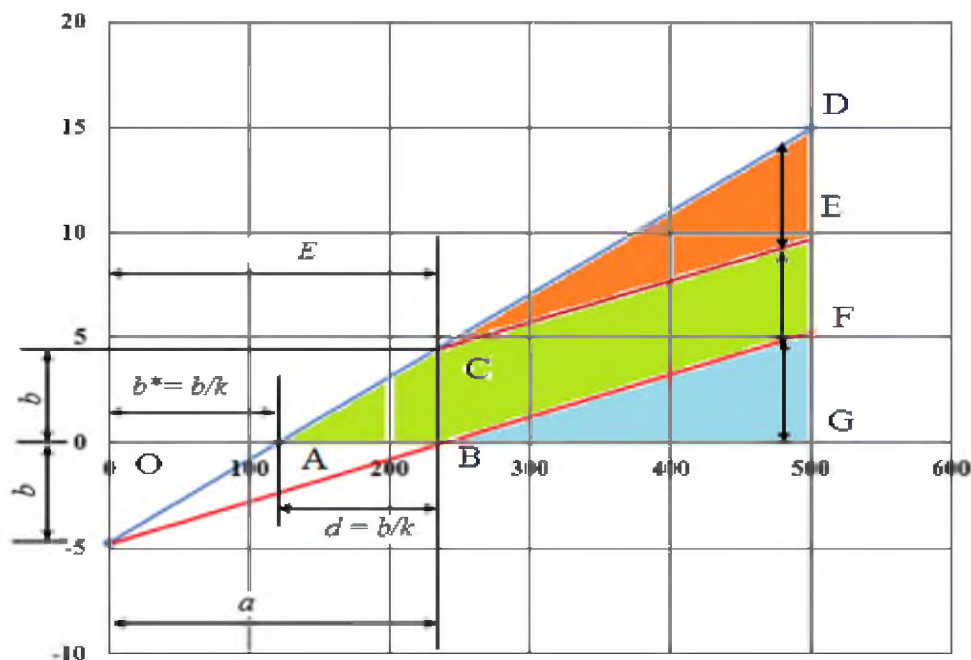


Рисунок 5 – Графическое изображение элементов водного баланса водосборов бассейна реки Есиль

циям, расположенным в бассейне реки, можно представить в общем виде $Y = k \cdot P - b$, т. е. $Y = k \cdot (P - b/k) = k \cdot (P - a)$, тогда b является частью a , которая описывается следующим уравнением:

$$b = k \cdot a.$$

Итак, свободный член (b) линейного уравнения $Y = k \cdot P - b$ является составной частью параметра a . Он представляет определенный интерес для остальных составляющих величин параметра a . Возникает необходимость вводить новые обозначения в уравнение водного баланса речных бассейнов:

$$a - b/k = d; \quad a - b^* = d; \quad P - k \cdot P = c.$$

На основе графического изображения элементов водного баланса водосбора бассейна реки Есиль свободный член линейно-корреляционного уравнения $Y = k \cdot P - b$ принимаем $b = k \cdot a/2$ и решаем систему уравнений относительно a . Тогда получаем следующее уравнение:

$$a = 2 \cdot (k \cdot P - Y) / k.$$

При этом на основе графического изображения элементов водного баланса водосбора бассейна реки Есиль можно представить следующие равенства показателей линейно-корреляционных уравнений:

$$c - (a - b^*) = c - d; \quad b^* = d.$$

Таким образом, составными частями a являются три параметра, т. е. b , d и c , которые описываются следующими системами линейно-корреляционных уравнений:

$$P - k \cdot P - a + b^* = c - d, \text{ мм};$$

$$P - k \cdot P - a + b/k = c - b/k, \text{ мм};$$

$$P - k \cdot P - \frac{2 \cdot (k \cdot P - Y)}{k} + \frac{2 \cdot b}{k} = c, \text{ мм};$$

$$\left[k \cdot P - k^2 \cdot P - \frac{2(k \cdot P - Y)}{k} + \frac{2 \cdot (k \cdot P - Y)}{k} \right] = c, \text{ мм}$$

$$c = k \cdot P(1 - k), \text{ мм}.$$

Если линейно-корреляционное уравнение $P - k \cdot P - a + b^* = c - d$ решим относительно параметра a с учетом параметров b, d и c , тогда получим следующие уравнения:

$$P - k \cdot P - a + \frac{b}{k} = k \cdot P \cdot (1 - k) - \frac{b}{k};$$

$$a = \frac{2 \cdot b}{k} + [(P - k \cdot P) - k \cdot P \cdot (1 - k)],$$

т. е. после некоторых преобразований разность выражения, стоящего в квадратных скобках уравнения $a = 2 \cdot b / k + [(P - k \cdot P) - k \cdot P \cdot (1 - k)]$, будет выглядеть так:

$$[(P - k \cdot P) - k \cdot P \cdot (1 - k)] = (P - k \cdot P)(1 - k);$$

$$a = 2 \cdot b / k + [(P - k \cdot P)(1 - k)].$$

Итак, система линейно-корреляционных уравнений может быть отнесена к уравнению водного баланса на основании представлений, принятых в гидрологии, в генетической теории стока.

При этом согласно генетической теории стока А. Н. Бефани [5] атмосферные осадки, выпадающие в водосборе речных бассейнов, при трансформации их в речной сток, стекают не полностью, т. е. на разных стадиях формирования водообразования происходят потери атмосферных осадков и речного стока.

Одними из главных являются потери на впитывание в почву, представляющие впоследствии величину суммарного испарения с поверхности почвенного и растительного покровов водосборов речных бассейнов.

Потери атмосферных осадков и речного стока на впитывание в почву – достаточно сложный физический процесс. Он является основой генетической теории стока. У него три составляющих [5]: слой впитывания в процессе водообразования (V_b), слой впитывания на спаде стока после окончания водообразования (V_o) и слой впитывания после окончания стока в замкнутых понижениях (V_k).

Если рассматривать с этих позиций формирование слоя стока в водосборах бассейна реки Есиль, то из их графического изображения элементов водного баланса видно, что впитывание в почву стока начинается с некоторым запаздыванием по отношению к началу выпадения атмосферных осадков. Это запаздывание выражается отрезком $b^* = b/k$ (см. рисунок 5), который согласно генетической теории стока является суммой двух параметров – слоя впитывания в процессе водообразования (V_b) и слоя впитывания после окончания стока в замкнутых понижениях (V_k), т. е. $b^* = V_b + V_k$. Кроме того, $b^* = b/k$ учитывает слой впитывания на спаде стока после окончания водообразования (V_o), тогда $V_o = b^*[(1-k)/k]$.

Таким образом, сумма слоя впитывания в процессе водообразования (V_b), слоя впитывания на спаде стока после окончания водообразования (V_o) и слоя впитывания после окончания стока в замкнутых понижениях (V_k), формирующихся в процессе потерь атмосферных осадков и речного стока, т. е. $b^* + b^*[(1-k)/k]$ и $a = 2 \cdot (k \cdot P - Y) / k = 2 \cdot b / k$, суммарное испарение с поверхности почвенного и растительного покровов водосборов речных бассейнов будет равняться:

$$E_o = a = 2 \cdot b / k + [(P - k \cdot P)(1 - k)].$$

В соответствии с линейно-корреляционной моделью и генетической теорией стока свободный член $b = k \cdot b^*$ уравнения регрессии представляет собой сумму трех видов впитывания в почву:

$$b^* = V_b + V_o + V_k = k \cdot P - Y.$$

Если $a = b^* + b^*[(1-k)/k]$ характеризует суммарное испарение, формирующееся за счет впитывания, аккумуляции атмосферных осадков на поверхности водосборов речных бассейнов как до начала, так и в процессе активного водообразования и после его окончания, тогда выражение $P(1-k)$ учитывает потери атмосферных осадков в процессе формирования стока, которые выражаются $V_o = b^*[(1-k)/k]$ – слоя впитывания на спаде стока после окончания водообразования.

При этом $c = k \cdot P(1 - k)$ показывает потери атмосферных осадков на инфильтрацию с поверхности почвенного покрова водосбора речных бассейнов: $U = c = k \cdot P(1 - k)$, которые свидетельствуют, что распределение элементов водного баланса имеет зональную закономерность и отражает физические процессы, происходящие на водосборе речных бассейнов.

Как видно из графического изображения элементов водного баланса водосбора бассейна реки Есиль, часть атмосферных осадков, выраженная отрезком OA , отражает сумму $b^* = V_b + V_k$, характеризующую потери атмосферных осадков и речного стока, слоя выпитывания в процессе водообразования (V_b) и слоя выпитывания после окончания стока в замкнутых понижениях (V_k). Часть атмосферных осадков, выраженная отрезком AB , соответствует потерям стока на спаде стока после окончания водообразования (V_o). Отрезок OB , характеризующий часть атмосферных осадков, соответствует суммарному испарению (транспирация и физическое испарение) с поверхности почвенного и растительного покровов водосборов речных бассейнов. Следовательно, треугольник ECD , выделенный оранжевым цветом (см. рисунок 5), показывает изменение слоя выпитывания атмосферных осадков с поверхности почвенного покрова, треугольник GBF , выделенный голубым цветом, – изменение слоя речного стока (Y), формирующегося за счет атмосферных осадков водосбора речных бассейнов, геометрическая фигура $FBACE$, выделенная зеленым цветом, – изменение слоя выпитывания на спаде стока после окончания водообразования (V_o).

Выводы. На основе генетической теории стока (А. Н. Бефани) и теоретического обоснования линейно-корреляционной модели водного баланса речных бассейнов (З. К. Иофин), использования информационно-аналитических материалов РГП «Казгидромет» за 1950–2017 годы по гидрологической станции Долматова и метеорологическим станциям Нур-Султан (Астана), Атбасар, Есиль, Рузаевка, Явленка и Петропавловск, расположенных в водосборах бассейна реки Есиль, получены линейно-корреляционные уравнения с высоким коэффициентом на базе программы Microsoft Excel. Они характеризуют зависимость слоя стока от слоя атмосферных осадков речных бассейнов, позволяющих выявить их математические и физические признаки, которые представлены в виде графических изображений элементов водного баланса и потери атмосферных осадков и речного стока: слоя выпитывания в процессе водообразования (V_b), слоя выпитывания на спаде стока после окончания водообразования (V_o) и слоя выпитывания после окончания стока в замкнутых понижениях (V_k).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление. В 21 т. –Т. V. Климат Казахстана – основа формирования водных ресурсов / Под науч. ред. В. Г. Сальникова. – Алматы, 2012. – 430 с.
- [2] Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление. В 21 т. –Т. VII. Ресурсы речного стока Казахстана. Кн.1: Возобновляемые ресурсы поверхностных вод Западного, Северного, Центрального и Восточного Казахстана / Под науч. ред. Р. И. Гальперина. – Алматы, 2012. – 684 с.
- [3] Научно-прикладной справочник по климату СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – Кн. 1. – № 18. – 514 с.
- [4] Мустафаев Ж.С., Козыкеева А.Т., Калмашова А.Н., Кирейчева Л.В. Влияние климата на гидрологический режим водосбора бассейна реки Есиль // Международный технико-экономический журнал. – 2018. – № 5. – С. 85-94.
- [5] Мустафаев Ж.С., Козыкеева А.Т., Калмашова А.Н. Особенности формирования гидрологического режима стока бассейна реки Есиль // Гидрометеорология и экология. – 2018. – № 1. – С. 66-74.
- [6] Mustafayev Zh.S., Kozykeyeva A.T., Kalmashova A.N., Aldiyarova A.E., Arvydas Povilaitis. Ecological and water economic assessment of the Yesil river basin catchment area // News of the National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. – 2020. – Vol. 2, N 440. – P. 123-131.
- [7] Иофин З.К. Линейно-корреляционная модель водного баланса как отражение генетической теории стока // Журнал Университета водных коммуникаций. – 2012. – Вып. IV(XVI). – С. 15-22.
- [8] Иофин З.К. Математические и физические признаки коэффициента регрессии в зависимостях слоя стока от слоя атмосферных осадков // Природообустройство. – 2018. – № 2. – С. 6-9.
- [9] Бефани А.Н. Основы теории ливневого стока // Труды Одесского гидрометеорологического института. – Л.: Гидрометеиздат, 1958. – 310 с.
- [10] Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник. – М.: Юрайт, 2016. – 479 с.
- [11] Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами. – М., 1982. – 271 с.

- [12] Ольдекоп Э.М. Испарение с поверхности речных бассейнов. – Юрьев, 1911. – 209 с.
[13] Оппоков Е.В. Осадки, сток и испарение в бассейне Днепра выше Киева (по новейшим данным) // Исследование рек СССР. – 1935. – Вып. 7. – С. 38-54.
[14] Великанов М.А. Водный баланс суши. – М.: Гидрометеиздат, 1940. – 140 с.

REFERENCES

- [1] Water resources of Kazakhstan: assessment, forecast, management. In 21 vol. Vol. V: The climate of Kazakhstan - the basis for the formation of water resources / Under scientific. ed. V. G. Salnikova. Almaty, 2012. 430 p. (in Russ.).
[2] Water resources of Kazakhstan: assessment, forecast, management. In 21 vol. Vol. VII: Resources of the river flow of Kazakhstan. Book 1: Renewable surface water resources of Western, Northern, Central and Eastern Kazakhstan / Under scientific. ed. R. I. Galperin. Almaty, 2012. 684 p. (in Russ.).
[3] Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. L.: Gidrometeoizdat, 1989. Book 1. N 18. 514 p. (in Russ.).
[4] Mustafaev Zh.S., Kozykeeva A.T., Kalmashova A.N., Kireicheva L.V. The influence of climate on the hydrological regime of the catchment area of the Esil river basin // International technical and economic journal. 2018. N 5. P. 85-94 (in Russ.).
[5] Mustafaev Zh.S., Kozykeeva A.T., Kalmashova A.N. Features of the formation of the hydrological flow regime of the Esil river basin // Hydrometeorology and ecology. 2018. N 1. P. 66-74 (in Russ.).
[6] Mustafayev Zh. S., Kozykeyeva A. T., Kalmashova A. N., Aldiyarova A. E., Arvydas Povilaitis. Ecological and water economic assessment of the Yesil river basin catchment area // News of the National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. 2020. Vol. 2, N 440. P. 123-131.
[7] Iofin Z.K. Linear-correlation model of water balance as a reflection of the genetic theory of runoff // Journal of the University of Water Communications. 2012. Issue IV (XVI). P. 15-22 (in Russ.).
[8] Iofin Z.K. Mathematical and physical features of the regression coefficient in the dependence of the runoff layer on the precipitation layer // Prirodoobustroystvo. 2018. N 2. P. 6-9 (in Russ.).
[9] Befani A.N. Fundamentals of the storm runoff theory // Proceedings of the Odessa Hydrometeorological Institute. L.: Gidrometeoizdat, 1958. 310 p. (in Russ.).
[10] Gmurman V.E. Probability theory and mathematical statistics: Textbook. M.: Yurayt, 2016. 479 p. (in Russ.).
[11] Kritskiy S.N., Menkel M.F. Hydrological foundations of water management systems. M., 1982. 271 p. (in Russ.).
[12] Oldekop E.M. Evaporation from the surface of river basins. Yuriev, 1911. 209 p. (in Russ.).
[13] Oppokov E.V. Precipitation, runoff and evaporation in the Dnieper basin above Kiev (according to the latest data) // Research of rivers of the USSR. 1935. Issue 7. P. 38-54 (in Russ.).
[14] Velikanov M.A. Water balance of land. M.: Gidrometeoizdat, 1940. 140 p. (in Russ.).

Ж. С. Мұстафаев¹, А. Н. Калмашова²

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

²Магистр, докторант PhD, «су ресурстары және мелиорация» кафедрасының профессорі
(Қазақ ұлттық аграрлық университеті, Алматы, Қазақстан)

ЕСІЛ ӨЗЕНІ БАССЕЙІНІҢ СУ БАЛАНСЫНЫҢ СЫЗЫҚТЫҚ-КОРРЕЛЯЦИЯЛЫҚ ҮЛГІСІ

Аннотация. Есіл өзенінің сужинау алабына орналасқан «Қазғидромет» РМӨ-нің Долوماتов ғидрологиялық бекетінің және Нұр-Сұлтан (Астана), Атбасар, Есіл, Рузаевка, Явленка және Петропавл метеорологиялық бекеттерінің 1950–2017 жылдарды қамтитын көпжылылық ақпараттық-талдау мәліметтерінің және су ағынының генетикалық теориясының негізінде Microsoft Excel бағдарламасын пайдаланып, су ағынының және өзен алабындағы атмосфералық жауын-шашынның қабатының арасындағы байланысты сипаттайтын жоғарғы байланыс көрсеткішке ие сызықтық -байланыс теңдеуі алындыжәне оның су теңгермесінің теңдеуі бөлшектері ретінде тұрғызылған сызбалық сұлбасы су ағынының және атмосфералық жауын-шашынның су ағынының пайда болу кезіндегі топырақ қабатына сіңуіне (V_b), су ағынының пайда болу кезеңі біткеннен кейінгі су ағынының әлсіруі кезіндегі топыраққа судың сіңуіне (V_o) және су ағыны тоқтағаннан кейін тұйықталған сайлардағы судың сіңуіне (V_k) кететін шығындарын, олардың математикалық және физикалық мағаналарын анықтауға мүмкіншілік береді.

Түйін сөздер: өзен ағынының қабаты, атмосфералық жауын-шашын қабаты, байланыс көрсеткіші, байланыс теңдеуі, ағынның генетикалық теориясы, топыраққа судың сіңуі, буланудың жиынтығы .

Zh. S. Mustafaev¹, A. N. Kalmashova²

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of «Water Resources and melioration»
(Kazakh National Agrarian University, Almaty, Kazakhstan)

²Master, PhD doctoral student «Water Resources and melioration»
(Kazakh National Agrarian University, Almaty, Kazakhstan)

LINEAR CORRELATION MODEL OF THE WATER BALANCE OF THE ESIL RIVER BASIN

Abstract. Based on the genetic theory of runoff, methods of mathematical statistics and the use of long-term information and analytical materials of the RSE "Kazhydromet" on the hydrological station Dolmatova and meteorological stations Nur-Sultan (Astana), Atbasar, Esil, Ruzayevka, Yavlenka and Petropavlovsk, located in the catchments of the Esil river basin covering 1950-2017, a linear correlation equation with a high correlation coefficient was obtained based on the Microsoft Excel program, which characterizes the dependence of the runoff layer on the atmospheric precipitation layer of river basins, which makes it possible to identify their mathematical and physical features, which are presented in the form of a graphical representation of water balance elements river basins, which makes it possible to determine the loss of atmospheric precipitation and river runoff: the absorption layer in the process of water formation (V_b), the absorption layer at the runoff decline after the end of water formation (V_o) and the absorption layer after the end of runoff in closed depressions (V_k).

Keywords: river runoff layer, precipitation layer, regression coefficient, regression equation, genetic theory of runoff, soil absorption, evapotranspiration.