ТРУДЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ИНСТИТУТА ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

www.journal.spb-niilh.ru
ISSN 2079-6080

DOI 10.21178/2079-6080.2024.2.4
УДК 630* 5:577.4:303.7

Гидротермические условия для роста лесов в Иракском Курдистане и прогнозирование экстремальных засух

© Х.К.А. Авла, А.С. Алексеев

Hydrothermal conditions for forest growth in Iraqi Kurdistan and prediction of extreme droughts

Awla Hardy Kakakhan Awla, A.S. Alekseev (Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov)

The provision of woody plants with heat and moisture is one of the most important environmental conditions for their successful growth. In the conditions of Iraqi Kurdistan, the second of these environmental factors is at a minimum, and the first is at the maximum of the tolerance curve for woody plants in accordance with Shelford's law. In the article, based on meteorological data for 1995–2021, an analysis of the possible causes of abnormal droughts, of which five occurred during the studied period, is carried out. Data analysis revealed the following two factors that most often accompany extreme droughts. The first factor is the absence of the sum of all annual precipitation in the months of the growing season, the second is the excess of the average temperature of the growing season above the norm. Using the median test, it was found that fluctuations in the meteorological characteristics of the climate in the studied area are random, while the temperatures of the growing season tend to increase with determination coefficients from 16 to 32 %, while the average annual temperatures do not have such trends. The average annual precipitation tends to increase with determination coefficients from 30 to 48 %, while precipitation during the growing season does not tend to increase, moreover, there are frequent cases when all months of the year without precipitation fall on the months of the growing season. A strong statistical dependence of the total probability of the onset of droughts and the frequency of the absence of the amount of annual precipitation in the months of the growing season, the coefficient of determination of which is 97.4 %, has been established. Using probabilistic analysis based on the Bayes formula, it was found that two possible causes of abnormal droughts have high probabilities of realization, as a result of which there is an unstable situation in the region as a whole with providing plant growth with heat and moisture.

Key words: temperature, precipitation, time series, median test, Bayes formula, causes of droughts, forecast of droughts

Гидротермические условия для роста лесов в Иракском Курдистане и прогнозирование экстремальных засух

Х.К.А. Авла, А.С. Алексеев

Обеспеченность древесных растений теплом и влагой относится к наиболее важным экологическим условиям для их успешного роста. В условиях Иракского Курдистана второй из указанных экологических факторов находится на минимуме, а первый – на максимуме кривой толерантности для древесных растений в соответствии с законом Шелфорда. В статье, на основе метеорологических данных за 1995–2021 годы, проведен анализ возможных причин возникновения аномальных засух, которых за изучаемый период произошло пять. В результате выявлены два фактора, которые чаще всего сопутствуют экстремальным засухам. Первый из них – совпадение периодов с отсутствием осадков с вегетационным сезоном, второй – превышение средней температурой вегетационного сезона ее нормального значения. С помощью медианного теста установлено, что колебания метеорологических характеристик климата на изучаемой территории имеют случайный характер, при этом температуры вегетационного сезона имеют тенденцию к росту с коэффициентами детерминации от 16 до 32 %, в то время как со среднегодовыми температурами этого не происходит. Среднегодовые количества осадков имеют тенденцию к росту с коэффициентами детерминации от 30 до 48 %, в то время как по осадкам за вегетационный сезон этого не наблюдается. Более того, часты случаи когда все месяцы года без осадков приходятся на вегетационный сезон. Установлена сильная статистическая зависимость полной вероятности наступления засух и частоты совпадения периодов с отсутствием осадков с вегетационным сезоном, коэффициент детерминации которой составляет 97,4 %. С помощью вероятностного анализа на основе формулы Байеса было установлено, что две возможные причины аномальных засух имеют высокие вероятности реализации, в результате чего в регионе в целом существует нестабильная ситуация с обеспечением растений теплом и влагой.

Ключевые слова: древесные растения, температура, осадки, временные ряды, медианный тест, формула Байеса, причины засух, прогноз засух

Авла Харди Какакхан Авла – аспирант кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем

Алексеев Александр Сергеевич – заведующий кафедрой лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем, профессор, доктор географических наук
E-mail: a_s_alekseev@mail.ru

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»
194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 5, Российская Федерация
Телефон: +7 (812) 217-93-16

Введение

Известно, что обеспеченность древесных растений теплом и влагой относится к наиболее важным экологическим условиям для их успешного роста [1, 2, 5, 6, 9, 11, 12, 19]. В условиях Иракского Курдистана второй из указанных экологических факторов находится на минимуме, а первый – на максимуме кривой толерантности для древесных растений, в соответствии с законом Шелфорда [12]. Недостаток влаги, определяемый количеством осадков, и избыток тепла, определяемый высокой температурой, особенно в течение вегетационного сезона, могут ограничивать рост древесных растений.

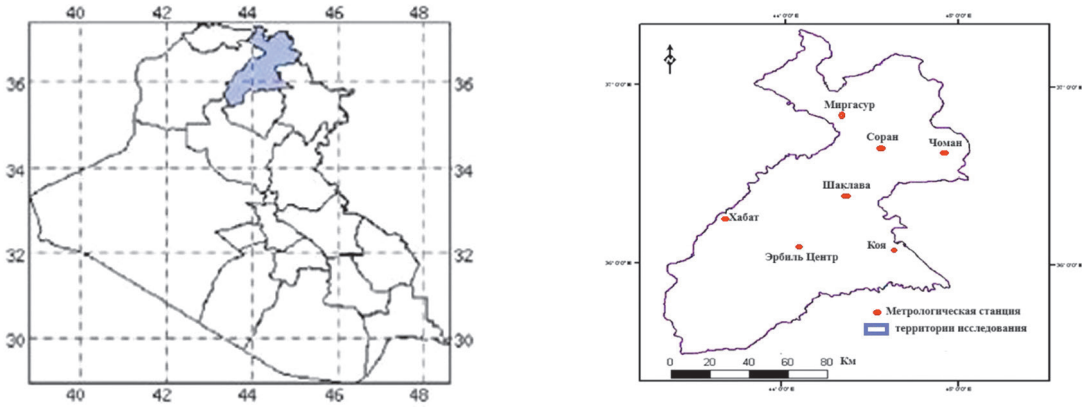
За последние три десятилетия Ирак столкнулся с увеличением частоты и усилением засух, возможно, в связи с последними изменениями климата в сторону его общего потепления. Уменьшился сток рек Тигр и Евфрат, что ухудшило ситуацию в Курдистане в целом и в районе г. Эрбиль в частности [1, 21].

Засухи представляют собой серьезную угрозу для существования растительности и возникают из-за наличия двух факторов, таких как недостаточное количество осадков в вегетационный сезон и повышенное испарение в связи с высокой температурой воздуха [2, 7, 18]. Кроме этого, имеет значение и чрезмерное использование воды для полива сельскохозяйственных растений, у которых потребление воды на создание единицы органического вещества выше, чем у древесных растений [8, 11, 14]. Лесные экосистемы тоже страдают от засух, но их наличие может препятствовать наступлению климатических катаклизмов [10, 15, 16, 20, 22].

Объекты и методика исследований

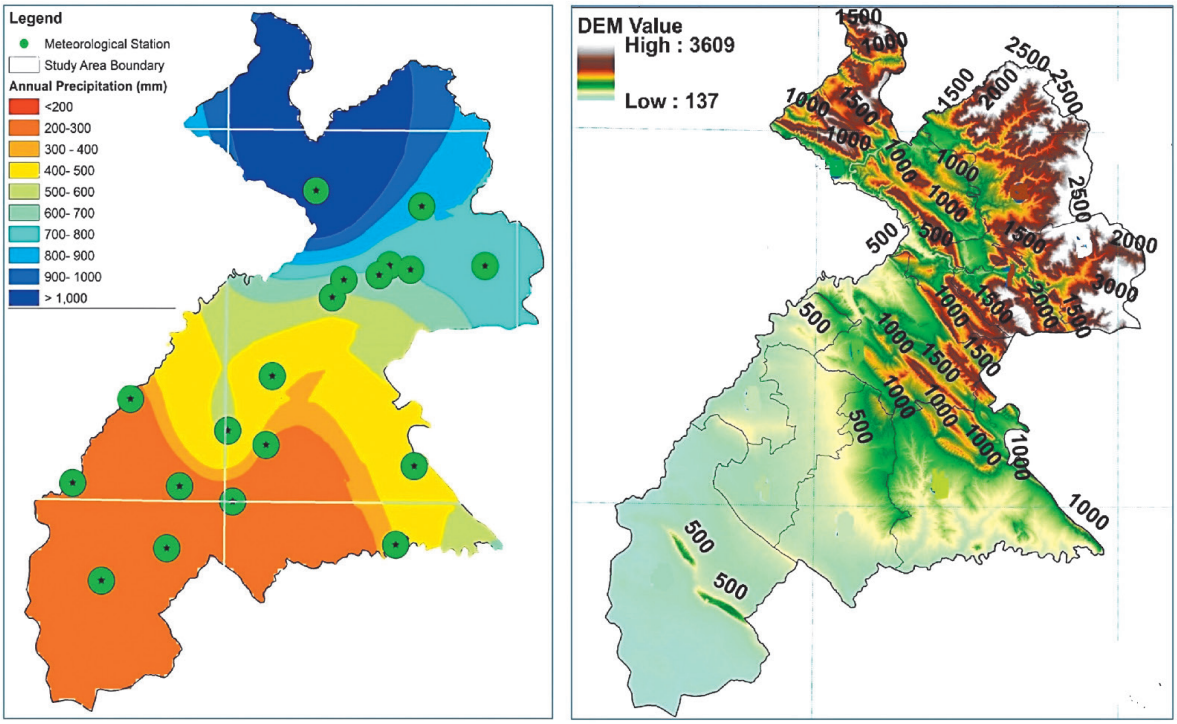
Исследование гидротермических условий для роста лесов и прогнозирование засух проводилось для провинции Эрбиль на севере Ирака, занимающей площадь около 15038,98 км^2. В целом климат в районе исследований преимущественно континентальный, субтропический и полузасушливый, в горных районах характерен его средиземноморский вариант. Осадки выпадают в основном с октября по май, за пределами вегетационного сезона, среднегодовое количество осадков составляет в зависимости от расположения территории от менее 200 мм/год на юго-западе изучаемой территории до более 1000 мм/год в горных районах на северо-востоке. Для изучаемой территории были собраны месячные метеорологические данные о температурах и осадках за период в 27 лет с 1995 по 2021 год. Для анализа данных в форме временных рядов применялись методы теории вероятностей и математической статистики.

Общая характеристика района исследований представлена на рис. 1 [1].



А Б

Рис. 1. Общая характеристика исследуемой территории:
А – регион г. Эрбиль на карте Ирака; В – расположение метеорологических станций и изучаемых районов;



С Д

Рис. 1. Общая характеристика исследуемой территории:
С – географическое распределение годовых осадков (мм/год) в провинции Эрбиль в период 1995–2021 гг.; D – цифровая модель рельефа провинции Эрбиль

По приведенным данным видно, что изучаемая территория находится в северо-восточной части Ирака, метеорологические станции расположены на всей территории; годовые осадки закономерно снижаются с северо-востока на юго-запад, от горных районов к равнинным, в соответствии с высотой над уровнем моря, описываемой цифровой моделью рельефа.

Площади районов на изучаемой территории и растительного покрова представлены на рисунке 2 и в таблице 1.

Таблица 1

Облесенность изучаемой территории

Район	Общая площадь, га	Площадь, занятая растительностью	
		га	%
Чоман	89174	11742	13,2
Мергасур	193548	41911	21,6
Соран	215132	24476	11,4
Шаклава	143770	12630	8,8
Хабат	121940	7865	6,4
Коя	204964	14948	7,3
Эрбиль центр	55329	4010	7,2
Всего по региону	1023857	117582	10,8

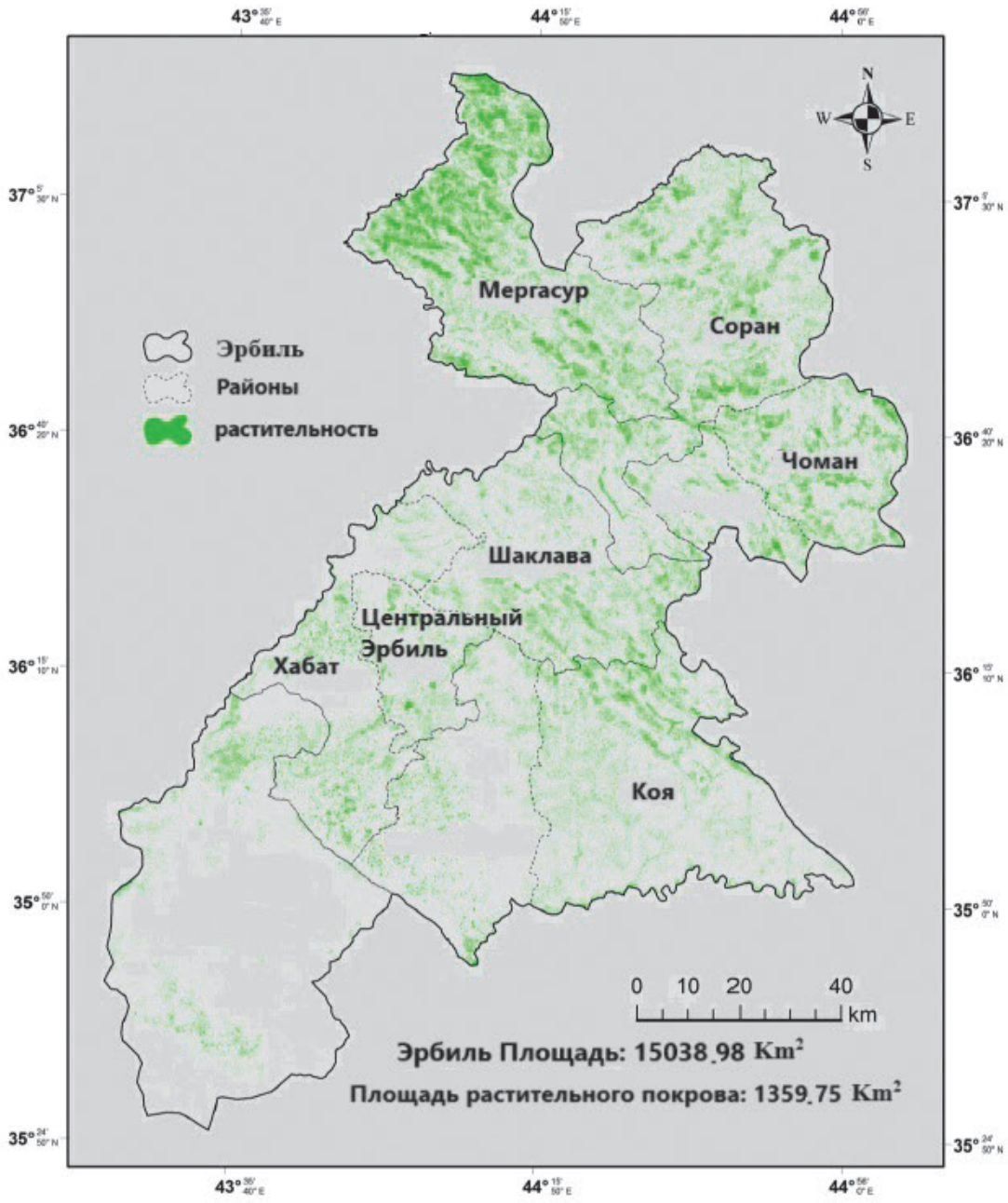


Рис. 2. Площадь растительного покрова на изучаемой территории

Приведенные данные свидетельствуют о том, что растительность занимает небольшую долю площади изучаемой территории – в среднем 10,8 % и колеблется от 6,4 % в районе Хабат до 21,6 % в районе Мергасур.

Основными древесными породами в регионе являются сосна калабрийская, кипарис вечнозеленый, дуб ливанский, фисташка настоящая, туя западная и мелия ацедарах.

Средние данные по температуре и осадкам за 1995–2021 годы по районам представлены в таблице 2.

Таблица 2

Средние данные по температуре и осадкам за 1995–2021 годы по районам

Район	Температура воздуха, °С		Суммарное количество осадков		
	За год	За вегетационный сезон	За год, мм	За вегетационный сезон	
				Всего, мм	Доля от суммы за год,%
Соран	10,7	19,1	236	49	20,8
Чоман	13,6	22,2	248	43	17,3
Мергасур	14,7	23,4	244	49	20,1
Шаклава	17,5	26,1	238	37	15,5
Коя	20,7	29,7	228	33	14,5
Хабат	20,7	29,8	255	36	14,1
Эрбиль центр.	21,8	30,8	214	25	11,8
В целом по региону	17,1	25,9	238	39	16,4

Как видим, температурный режим на изучаемой территории является вполне комфортным для роста и развития растительности, в то время как осадки являются явным лимитирующим фактором. Особенно недостаточное их количество приходится на вегетационный сезон, когда их доля от средней годовой суммы колеблется от 11,8 % (района Эрбиль центральный) до 20,8 % (район Соран). Наблюдается тенденция снижения доли осадков за вегетационный сезон с увеличением температуры за тот же период. Анализ метеорологических данных выявил сильные засухи в 1999, 2000, 2008, 2012 и 2021 годах, которые привели к соответствующим сокращениям растительного покрова, с наибольшими последствиями в районах Чоман и Хабат в 2008 году. Обильные осадки на всей территории были зарегистрированы в 2019 году, что благоприятно сказалось на состоянии растительного покрова.

Временные ряды метеорологических данных были проверены на случайность происходящих изменений с помощью медианного теста [17]. Критерий случайности временного ряда, основанный на его медиане, проверяется следующим образом:

1. Временной ряд упорядочивается по возрастанию $x1>x2>...> x$N,

2. Определяется медиана: в случае нечетного числа членов ряда медиана равна:

$$x_{med} = x_{\frac{N+1}{2}},$$

В случае четного числа:

$$x_{med} = \frac{1}{2}(x_{\frac{N}{2}} + x_{\frac{N}{2}+1})$$

3. Сравнивая члены исходного ряда с медианой, строим ряд по следующему правилу:

$$y_t = \begin{cases} +, \text{если } x_t > x_{med,} \\ 0, \text{если } x_t = x_{med}, \\ -, \text{если } x_t < x_{med.} \end{cases}$$

Далее в этой последовательности нули не учитываются.

4. Вычисляется статистика для теста (тестовая статистика):

$$Z = \frac{R - \bar{R}}{s_R},$$

где $\overline{R}$ – ожидаемое число положительных (отрицательных) членов в ряду;

R – фактическое число положительных (отрицательных) членов в ряду;

S_R – стандартное отклонение числа положительных (отрицательных) членов в ряду y_t:

$$\bar{R} = \frac{2 * n_1 * n_2}{n_1 + n_2} + 1;$$

$$s_R^2 = \frac{2 * n_1 * n_2 (2 * n_1 * n_2 - n_1 - n_2}{(n_1 + n_2)^2 * (n_1 + n_2 - 1)},$$

5. Проверка на случайность. Если выполнено следующее неравенство, то ряд случайный:

$$|Z| < Z_{1-\alpha/2};$$

При уровне значимости 5 % и $n_1 > 10$, $n_2 > 10$, $Z_{1-\alpha/2} = 1{,}96$

Медианный тест для анализируемых временных рядов температур и осадков проверялся с помощью пакета прикладных программ StATGRAPHICS 18.0. Медианный тест показал, что все проанализированные временные ряды температур и осадков, годичные и за вегетационный сезон оказались случайными.

Этот факт предопределил их дальнейший анализ методами теории вероятностей с использованием теоремы Байеса [3, 4, 17]. Формула Байеса позволяет по известному факту события (B) вычислить вероятность того, что оно было вызвано какой-либо предполагаемой причиной (A) или причинами. События, отражающие действие причин, в данном случае называют гипотезами, так как они – предполагаемые события, повлёкшие данное. Безусловную вероятность справедливости гипотезы (события) называют априорной, а условную, с учётом факта произошедшего события, апостериорной. В нашем случае изучаемым событием (B) является наступление (не наступление) экстремальной засухи. В случае одной рассматриваемой гипотезы (A) формула Байеса имеет следующий вид:

$$P(\mathrm{A}/\mathrm{B}) = \frac{P(\mathrm{B}/\mathrm{A}) * P(A)}{P(B)}$$

Если рассматривается несколько причин события (B), формула Байеса принимает следующий вид:

$$P(A_j/B) = \frac{P(B/A_j) * P(A_j)}{\sum_{j=1}^{N} P(B/A_j) * P(A_j)}$$

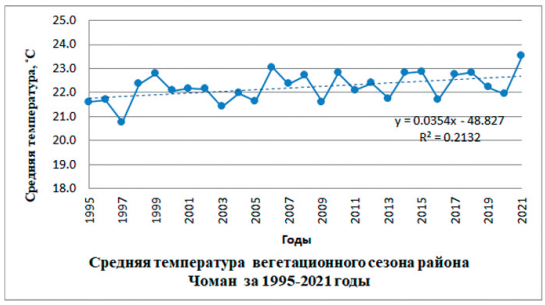
В нашем случае будут рассмотрены две возможные причины возникновения экстремальных засух. Все компоненты формулы Байеса могут быть рассчитаны с учетом того, что известны необходимые метеорологические данные за период 1995–2021 гг., из которых 5 лет были с экстремальными засухами.

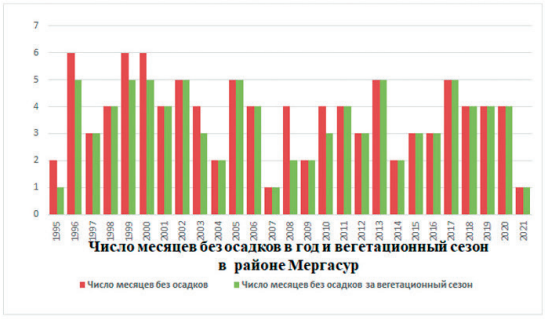
Результаты исследований и их обсуждение

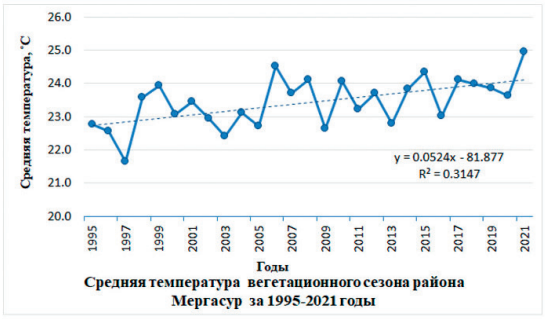
Анализ метеорологических данных за 1995–2021 годы с учетом их значений в годы сильных засух выявил следующие 2 фактора, которые чаще всего сопутствуют экстремальным засухам. Первый фактор – совпадения периодов с отсутствием осадков с вегетационным сезоном, второй – превышение средней температурой вегетационного сезона региональной нормы. За норму была взята средняя температура вегетационного сезона каждого из районов на изучаемой территории за 1995–2021 годы (см. табл. 2).

На рисунке 3 приведены данные по каждому району о числе месяцев в каждом году временного ряда и вегетационных сезонах, когда не было осадков, и о температурах за вегетационный сезон.

Данные, приведенные на рисунке, наряду со сведениями о годах, когда были аномальные засухи, позволяют вычислить вероятности (частоты) совпадения периодов с отсутствием осадков с вегетационным сезоном и годы с превышением региональной нормы средней температурой за вегетационный сезон. Такие случаи, когда годичные осадки полностью отсутствовали в месяцы вегетационного сезона, видны на рисунке 3. Средние температуры за вегетационный сезон по годам имеют некоторую тенденцию к росту, с коэффициентами детерминации от 16 до 32 %, однако вариации величин температуры по годам, как показал медианный тест, имеют случайный характер.







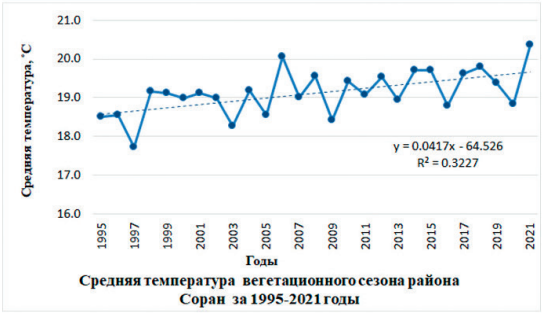
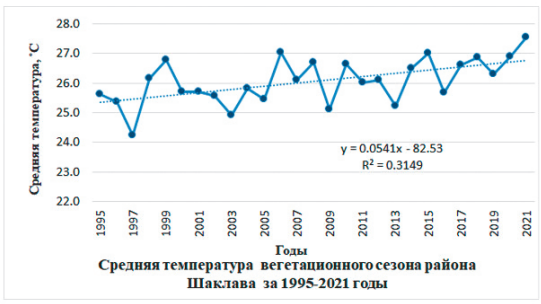
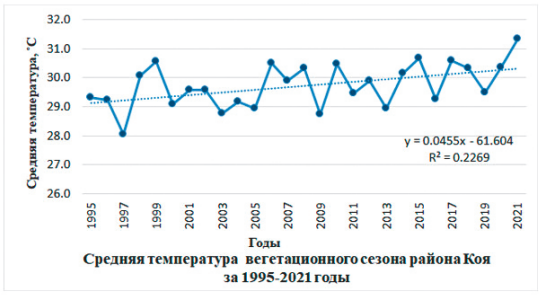
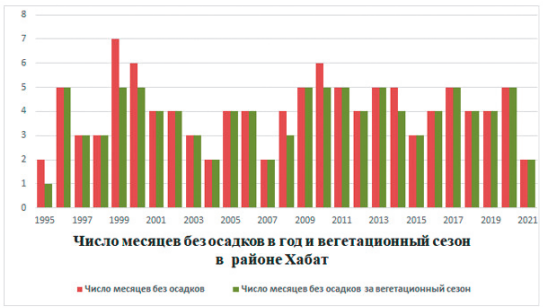
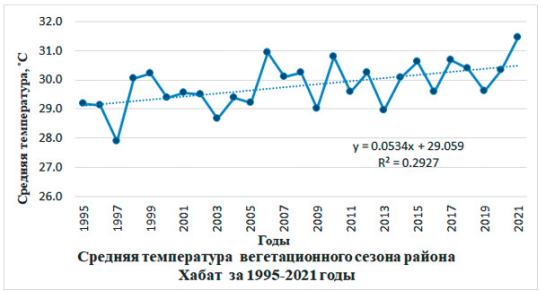


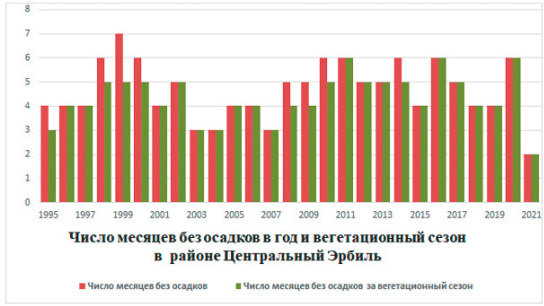
Рис. 3. Число месяцев в году и за вегетационный сезон
без осадков (слева) и среднее количество осадков за вегетационный сезон (справа)
по районам изучаемой территории











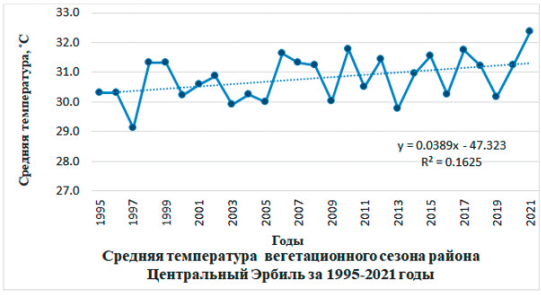


Рис. 3. Число месяцев в году и за вегетационный сезон
без осадков (слева) и среднее количество осадков за вегетационный сезон (справа)
по районам изучаемой территории

В таблице 3 приведены результаты расчетов по формуле Байеса априорных и апостериорных вероятностей двух гипотез о причинах наступления экстремальных засух, а также полной вероятности их наступления по районам изучаемой территории.

Таблица 3

Сводная таблица результатов вероятностного анализа причин наступления экстремальных засух с помощью формулы Байеса

Район	A_1		A_2		$P(B/A)$		$P(B)$
	$P(A_1)$	$P(A_1/B)$	$P(A_2)$	$P(A_2/B)$	$P(B/A_1)$	$P(B/A_2)$	
Чоман	0,70	0,53	0,48	0,47	0,60	0,80	0,80
Мергасур	0,74	0,40	0,56	0,60	0,40	0,80	0,74
Соран	0,67	0,30	0,52	0,70	0,20	0,60	0,45
Шаклава	0,70	0,49	0,48	0,51	0,40	0,60	0,57
Коя	0,74	0,40	0,48	0,60	0,60	0,80	0,83
Хабат	0,78	0,45	0,48	0,55	0,40	0,80	0,70
Эрбиль центр	0,70	0,40	0,52	0,60	0,40	0,80	0,70
Среднее по региону	0,67	0,41	0,48	0,59	0,40	0,80	0,65

Примечание. A_1 и A_2 – события (гипотезы) совпадения периодов с отсутствием осадков с вегетационным сезоном и превышения средней температуры за вегетационный сезон региональной нормы, соответственно; $P(A_1)$ и $P(A_2)$ – априорные вероятности гипотез, вычисляются как частоты таких событий за весь период с 1995 по 2021 год; $P(B/A_1)$ и $P(B/A_2)$ – вероятности наступления экстремальной засухи при наступлении событий A_1 и A_2, вычисляются по данным лет с экстремальными засухами; $P(A_1/B)$ и $P(A_2/B)$ – апостериорные вероятности указанных гипотез, вычисляются по формуле Байеса с учетом данных тех лет, когда были зафиксированы экстремальные засухи; $P(B)$ – полная вероятность наступления экстремальной засухи, вычисляется по формуле полной вероятности.

По итогам вероятностного анализа причин наступления экстремальных засух очевидно, что они обе имеют значение. При их сравнении видно, что априорная вероятность первой причины (гипотезы) наступления экстремальной засухи выше апостериорной, в то время как для второй причины – наоборот. Это свидетельствует о том, что экстремальная засуха чаще наступает при превышении средней температурой вегетационного сезона региональной нормы, чем при отсутствии осадков в месяцы вегетационного сезона. Об этом же свидетельствует и превышение условной вероятности $P(B/A_2)$ над $P(B/A_1)$.

Полная вероятность наступления засух варьирует по районам от 0,45 для района Соран до 0,83 для района Коя, и в среднем по региону г. Эрбиль составляет 0,65, что представляет собой достаточно большую величину. Эти вероятности в целом соответствуют цифровой модели рельефа изучаемого региона и территориальному распределению осадков (см. рис. 1). Вероятность аномальных засух растет в юго-западном направлении со снижением высоты над уровнем моря и величины осадков.

Был проведен регрессионный и дисперсионный анализ связи полной вероятности наступления засух и частоты совпадения периодов с отсутствием осадков с вегетационным сезоном. В результате между этими величинами была установлена достоверная и сильная связь с коэффициентом детерминации 97,4 %:

$$P(B) = 0{,}951 * P(A_1).$$

Результаты дисперсионного анализа этой связи представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты дисперсионного анализа связи полной вероятности наступления засух и частоты совпадения периодов с отсутствием осадков с вегетационным сезоном

Источник изменчивости	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средний квадрат	F-критерий Фишера	Значение P
Модель	3,2757	1	3,2757	224,34	0,0000
Остаток	0,0876	6	0,0146	-	-
Всего	3,3633	7	-	-	-

Приведенные данные показывают наличие высокой зависимости полной вероятности наступления засух и частоты совпадения периодов с отсутствием осадков с вегетационным сезоном. Таким образом, первая гипотетическая причина возникновения аномальных засух (A_1) также имеет существенное статистическое подтверждение.

Заключение

Изучаемая территория по своему рельефу и климату сильно фрагментирована и представлена районами, расположенными на разной высоте от уровня моря и имеющими различный климат – от средиземноморского до полузасушливого. Анализ временных рядов метеорологических данных с 1995 по 2021 год позволил установить, что в изучаемом районе имеют место существенные колебания температуры и осадков как за год, так и за вегетационный сезон. За 27 лет было 5 лет с аномальными засухами, то есть их частота составила 0,19. С помощью медианного теста установлено, что колебания метеорологических характеристик климата на изучаемой территории имеют случайный характер, при этом температуры вегетационного сезона имеют тенденцию к росту с коэффициентами детерминации от 16 до 32 %, в отличии от среднегодовых температур. Среднегодовые количества осадков имеют тенденцию к росту, с коэффициентами детерминации от 30 до 48 %, в то время как осадки за вегетационный сезон не имеют такой направленности, более того, часты случаи, когда все месяцы года без осадков совпадают с месяцами вегетационного сезона. Установлена сильная статистическая зависимость полной вероятности наступления засух и частоты совпадения периодов с отсутствием осадков с вегетационным сезоном, коэффициент детерминации которой составляет 97,4 %. С помощью вероятностного анализа на основе формулы Байеса было установлено, что 2 возможные причины аномальных засух имеют высокие вероятности реализации, в результате чего в регионе в целом существует нестабильная ситуация с обеспечением роста растений оптимальным количеством тепла и влаги, которая требует специального внимания, мониторинга и прогнозирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авла, Х.К.А. Анализ состояния растительного покрова Иракского Курдистана с использованием материалов дистанционного зондирования земли и ГИС-технологий / Х.К.А. Авла, А.С. Алексеев // Материалы III научно-технической конференции-вебинара «Цифровые технологии в лесном секторе» 24–25 февраля 2022 года. Санкт-Петербург, 2022. – С. 3–5. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49615653&pff=1 (дата обращения: 26.06.2024).
2. Бучинский, И.Е. Засухи и суховеи / И.Е. Бучинский. – Л. : Гидрометеоиздат, 1976. – 214 с.
3. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М. : Высшее образование, 2003. – 479 с.
4. Гнеденко, Б.В. Элементарное введение в теорию вероятностей / Б.В. Гнеденко, А.Я. Хинчин. – М. : Наука, 1976. – 168 с.
5. Горышина, Т.К. Экология растений : Учебное пособие / Т.К. Горышина. – М. : Высшая школа, 1979. – 368 с.

6. Двораковский, М.С. Экология растений : Учебное пособие для вузов / М.С. Двораковский. – М. : Высшая школа, 1983. – 190 с.
7. Дроздов, О.А. Засухи и динамика увлажнений / О.А. Дроздов. – Л. : Гидрометеоиздат, 1980. – 92 с.
8. Ионова, Е.В. Засуха и гидротермический коэффициент увлажнения как один из критериев оценки степени её интенсивности : обзор литературы / Е.В. Ионова, В.А. Лиховидова, И.А. Лобунская // Зерновое хозяйство России. – 2019. – № 6 (66). – С. 18–22.
9. Крамер, П. Физиология древесных растений / П. Крамер, Т. Козловский. – М. : Лесная промышленность, 1983. – 464 с.
10. Кузьмичев, А.М. Оценка засухоустойчивости древесных насаждений в Среднем Прихоперье / А.М. Кузьмичев, А.А. Овчаренко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 1 (8). – С. 1971–1974. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-zasuhoustoychivosti-drevesnyh-nasazhdeniy-v-srednem-prihoperie (дата обращения: 26.06.2024).
11. Лир, Х. Физиология древесных растений / Х. Лир, Г. Польстер, Г.И. Фидлер. – М. : Лесная промышленность, 1974. – 424 с.
12. Одум, Ю. Экология. В 2-х томах. Т. 1 / Ю. Одум. – М. : Мир, 1986. – 327 с.
13. Одум, Ю. Экология. В 2-х томах. Т. 2 / Ю. Одум. – М. : Мир, 1986. – 376 с.
14. Раунер, Ю.Л. Климат и урожайность зерновых культур / Ю.Л. Раунер. – М. : Наука, 1981. – 163 с.
15. Румянцев, Д.Е. Лес, засуха, урожай зерновых и дендрохронология / Д.Е. Румянцев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2019. – № 3 (81). – С. 82–86. – DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.81.3.014.
16. Саксонов, С.С. Влияние засух на приживаемость лесных культур / С.С. Саксонов // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – 2020. – Т. 29, № 4. – С. 37–42. – DOI 10.24411/2073-1035-20120-10354.
17. Севастьянов, Б.А. Курс теории вероятностей и математической статистики / Б.А. Севастьянов. – М. : Наука, 1982. – 256 с.
18. Селянинов, Г.Т. О сельскохозяйственной оценке климата / Г.Т. Селянинов // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. – 1928. – Вып. 20. – С. 165–177.
19. Судачкова, Н.Е. Действие засухи на формирование древесины и антиоксидантную защиту камбиальной зоны сосны обыкновенной / Н.Е. Судачкова, Л.И. Романова, И.Л. Милютина // Сибирский лесной журнал. – 2015. – № 5. – С. 54–63. – DOI: 10.15372/SJFS20150504.
20. Bogachev, M.I. Reversal in the drought stress response of the Scots pine forest ecosystem: Local soil water regime as a key to improving climate change resilience / M.I. Bogachev, A.M. Gafurov, P.Y. Iskandirov et. al. // Heliyon. – 2023. – Vol. 9, Is. 11, e21574. – P. 1–17. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21574.
21. Saeed, M.A. Analysis of Climate and Drought Conditions in the Federal region of Kurdistan / M.A. Saeed, K. Abas // International Scientific Journal Environmental Science. – 2012. – Vol. 2. – URL: http://environment.scientific-journal.com/abstracts/2/5.pdf (дата обращения: 26.06.2024).
22. Zhao, D. Effect of vegetation type on microstructure of soil aggregates on the Loess Plateau, China / D. Zhao, M. Xu, G. Liu, L. Ma, S. Zhang, T. Xiao, G. Peng // Agriculture, ecosystems & environment. – 2017. – № 1 (242). – P. 1–8. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.014.

REFERENCES

1. Avla Hardi Kakakhan Avla, Alekseev A.S. Analiz sostojanija rastitel'nogo pokrova Irakskogo Kurdistana c ispol'zovaniem materialov distancionnogo zondirovanija zemli i GIS-tehnologij [Analysis of the state of vegetation cover in Iraqi Kurdistan using remote sensing materials and GIS technologies]. *Materialy III nauchno-tehnicheskoj konferencii-vebinara «Cifrovye tehnologii v lesnom sektore» 24–25 fevralja 2022 goda [Materials of the III scientific and technical conference-webinar "Digital technologies in the forestry sector" on February 24–25, 2022].* Saint-Peterburg, 2022, pp. 3–5. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49615653&pff=1 (access date: 26.06.2024). (In Russian).
2. Buchinskij I.E. Zasuhi i suhovei [Droughts and hot winds]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1976, 214 p. (In Russian).
3. Gmurman V.E. Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. Moskow, Higher education, 2003, 479 p. (In Russian).
4. Gnedenko B.V., Hinchin A.Ja. Jelementarnoe vvedenie v teoriju verojatnostej [An Elementary Introduction to Probability Theory]. Moskow, Science, 1976, 168 p. (In Russian).

5. Goryshina T.K. Jekologija rastenij. Uchebnoe posobie [Plant Ecology: Textbook]. Moskow, Higher education, 1979, 368 p. (In Russian).
6. Dvorakovskij M.S. Jekologija rastenij. Uchebnoe posobie dlja vuzov [Plant ecology: Textbook for universities]. Moskow, Higher education, 1983, 190 p. (In Russian).
7. Drozdov O.A. Zasuhi i dinamika uvlazhnenij [Droughts and moisture dynamics]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1980, 92 p. (In Russian).
8. Ionova E.V., Lihovidova V.A., Lobunskaja I.A. Zasuha i gidrotermicheskij kojefficient uvlazhnenija kak odin iz kriteriev ocenki stepeni ejo intensivnosti (obzor literatury) [Drought and hydrothermal moisture coefficient as one of the criteria for assessing the degree of its intensity. Literature review]. *Zernovoe hozjajstvo Rossii [Grain farming in Russia],* 2019, no. 6 (66), pp. 18–22. (In Russian).
9. Kramer P., Kozlovskij T. Fiziologija drevesnyh rastenij [Physiology of woody plants]. Moskow, 1983, 464 p. (In Russian).
10. Kuz'michev A.M., Ovcharenko A.A. Ocenka zasuhoustojchivosti drevesnyh nasazhdenij v Srednem Prihoper'e [Assessment of drought resistance of tree plantations in the Middle Khoper region]. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk [News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences],* 2012, vol. 14, no. 1o. (8), pp. 1971–1974. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-zasuhoustoychivosti-drevesnyh-nasazhdeniy-v-srednem-prihoperie (access date: 26.06.2024). (In Russian).
11. Lir H., Pol'ster G., Fidler G.I. Fiziologija drevesnyh rastenij [Physiology of woody plants]. Moskow, Sc[ence, 1974, 424 p. (In Russian).
12. Odum Ju. Jekologija. V 2-h tomah. T. 1 [Ecology. In 2 volumes. V. 1]. Moskow, World, 1986, 327 p. (In Russian).
13. Odum Ju. Jekologija. V 2-h tomah. T. 2 [Ecology. In 2 volumes. V. 1]. Moskow, World, 1986, 376 p. (In Russian).
14. Rauner Ju.L. Klimat i urozhajnost' zernovyh kul'tur [Climate and grain yields]. Moskow, Science, 1981, 163 p. (In Russian).
15. Rumjancev D.E. Les, zasuha, urozhaj zernovyh i dendrohronologija [Forest, drought, grain harvest and dendrochronology]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Scientific Research Journal]*, 2019, no. 3 (81), pp. 82–86. DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.81.3.014. (In Russian).
16. Saksonov S.S. Vlijanie zasuh na prizhivaemost' lesnyh kul'tur [The influence of droughts on the survival rate of forest crops]. *Samarskaja Luka: problemy regional'noj i global'noj jekologii [Samarskaya Luka: problems of regional and global ecology],* 2020, vol. 29, no. 4, pp. 37–42. DOI 10.24411/2073-1035-20120-10354. (In Russian).
17. Sevast'janov B.A. Kurs teorii verojatnostej i matematicheskoj statistiki [Course on Probability Theory and Mathematical Statistics]. Moskow, Science, 1982, 256 p. (In Russian).
18. Seljaninov G.T. O sel'skohozjajstvennoj ocenke klimata [About agricultural climate assessment]. *Trudy po sel'skohozjajstvennoj meteorologii [Transactions on Agricultural Meteorology],* 1928, is. 20, pp. 165–177. (In Russian).
19. Sudachkova N.E., Romanova L.I., Miljutina I.L. Dejstvie zasuhi na formirovanie drevesiny i antioksidantnuju zashhitu kambial'noj zony sosny obyknovennoj [Effect of drought on wood formation and antioxidant protection of the cambial zone of Scots pine]. *Sibirskij lesnoj zhurnal [Siberian Forest Journal],* 2015, no. 5, pp. 54–63. DOI: 10.15372/SJFS20150504. (In Russian).
20. Bogachev M.I, Gafurov A.M., Iskandirov P.Y., Kaplun D.I., Kayumov A.R., Lyanova A., Pyko N.S., Pyko S.A., Safonova A., Sinitca A., Usmanov B., Tishin D. Reversal in the drought stress response of the Scots pine forest ecosystem: Local soil water regime as a key to improving climate change resilience. *Heliyon*, 2023, vol. 9, is. 11, e21574, pp. 1–17. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21574.
21. Saeed M.A., Abas K. Analysis of Climate and Drought Conditions in the Federal region of Kurdistan. *International Scientific Journal Environmental Science*, 2012, vol. 2. URL: http://environment.scientific-journal.com/abstracts/2/5.pdf (access date: 26.06.2024).
22. Zhao D., Xu M., Liu G., Ma L., Zhang S., Xiao T., Peng G. Effect of vegetation type on microstructure of soil aggregates on the Loess Plateau, China. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2017, May, no. 1 (242), pp. 1–8. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.014.

Статья поступила в редакцию 6.02.2024