

УДК 551.582

## КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КЛИМАТА В ПРИЛОЖЕНИИ К ОЦЕНКЕ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В РЕСПУБЛИКЕ КАЛМЫКИЯ<sup>1</sup>

© 2021 г. Н.А. Шумова

*Институт водных проблем РАН*

*Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3. E-mail: shumova\_aqua@rambler.ru*

Поступила в редакцию 27.04.2021. После доработки 30.06.2021. Принята к публикации 01.07.2021

Исследование направлено на оценку достоверности описания гидротермических условий территории Калмыкии количественными показателями климата, в основе которых лежат данные о температуре воздуха и осадках (доступны в базах данных и широко используются в климатических моделях). В настоящей работе рассматривается использование гидротермического коэффициента Селянинова, коэффициента увлажнения, индекса аридности Торнтвейта, метода Кёппена и схемы Холдриджа. Расчет количественных показателей климата выполнен за период 1966-2017 гг. на основе данных о среднемесечной температуре воздуха и месячных суммах осадков на метеорологической станции Яшкуль, расположенной на Чёрных землях – в самой засушливой части республики. Рассчитанные значения гидротермического коэффициента Селянинова за рассматриваемый период в 2 случаях соответствовали природной зоне пустынь, в 19 случаях – зоне полупустынь, в 31 случае – зоне степей. При использовании коэффициента увлажнения в 45 случаях климатические условия соответствовали зоне полупустыни, в 7 случаях – степи. Полученные значения индекса аридности Торнтвейта присущи природной зоне пустынь и сверхзасушливым регионам. Оценки по методу Кёппена свидетельствуют о том, что в 41 случае гидротермические условия, соответствовали природной зоне степей, в 4 случаях – зоне пустынь, в 7 случаях отмечена более высокая увлажненность территории. В соответствии со схемой Холдриджа гидротермические условия соответствовали зоне степей в 25 случаях, зоне пустынь в 27 случаях. Наибольшая достоверность присуща климатическим оценкам, полученным на основе гидротермического коэффициента Селянинова и свидетельствующим о гумидном потеплении в Калмыкии, которое подтверждается материалами наблюдений за формированием растительных сообществ на мелиорированных землях Приергенинской равнины. О гумидном потеплении свидетельствуют оценки, выполненные на основе метода Кёппена и схемы Холдриджа, и в меньшей степени – коэффициента увлажнения. Оценки, выполненные с использованием индекса аридности Торнтвейта, свидетельствуют об усилении аридизации территории, что не соответствует современной динамике климатических условий Калмыкии, и не являются достоверными.

*Ключевые слова:* количественные показатели климата, природные зоны, региональный уровень, Республика Калмыкия.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2021-4-13-24**

Ведущим фактором природной среды, определяющим состояние и развитие наземных экосистем, являются гидротермические условия территории, а именно соотношение ресурсов тепла и влаги (количественные показатели климата). Оценка гидротермических условий и их возможных изменений в применении к анализу состояния и развития наземных экосистем является чрезвычайно важной задачей. Для оценки гидротермических условий территории обычно используются условные показатели – это коэффициенты увлажнения (индексы увлажнения, индексы влажности, индексы

<sup>1</sup> Работа выполнена по теме Госзадания раздела 2.6 «Эволюция наземных экосистем в изменяющихся природных условиях» темы НИР ИВП РАН «Моделирование и прогнозирование процессов восстановления качества вод и экосистем при различных сценариях изменений климата и антропогенной деятельности» (№ 0147-2018-0002), № госрегистрации АААА-А18-118022090104-8.

гумидности) и индексы аридности (индексы сухости); общая информация о том, какие условные показатели используются для климатических оценок в настоящее время, приводится в Справочнике по показателям и индексам засушливости (Справочник ..., 2016).

Среди количественных показателей климата наибольшее распространение в нашей стране получили коэффициент увлажнения (Высоцкий, 1960) и гидротермический коэффициент Селянинова (Селянинов, 1928), для расчетов которых достаточно располагать информацией о температуре воздуха и осадках, представленных в базах метеорологических данных, что является их большим преимуществом.

При оценке уязвимости гидротермических условий и зональных границ засушливых земель Прикаспийской низменности с использованием различных сценариев изменения климата мы столкнулись с тем фактом, что конечный результат при прочих равных условиях зависит от выбранного метода их (гидротермических условий) оценки (Шумова, 2007). Было выявлено, что согласно оценкам, полученным при использовании коэффициента увлажнения, характеризующего годовой отрезок времени, гидротермические условия исследуемой территории могут стать более засушливыми при возможном изменении климата. При оценках с использованием гидротермического коэффициента Селянинова, описывающего период с температурами воздуха выше 10°C, наблюдается обратная картина – гидротермические условия при возможном изменении климата могут стать более благоприятными для ведения сельского хозяйства.

Аналогичная ситуация сложилась при использовании коэффициента увлажнения и гидротермического коэффициента Селянинова для оценки современных климатических условий в Республике Калмыкия (Шумова, 2020), выполненной на основе данных по температуре воздуха и осадкам на метеорологической станции Яшкуль за 1966-2017 гг. Среднегодовое значение коэффициента увлажнения за временной интервал 1966-2017 гг. составило 0.23, что, согласно классификации Н.Н. Иванова (1941), присуще полупустыне. Динамика гидротермического коэффициента Селянинова свидетельствует об увеличении увлажненности территории Калмыкии за временной интервал 1966-2017 гг.; среднегодовое значение гидротермического коэффициента составило 0.44 при диапазоне его изменения от 0.11 до 0.83, что по классификации Г.Т. Селянинова (1928) соответствует географической зональности от пустыни до типичной степи. В результате анализа динамики гидротермического коэффициента сделан вывод о гумидном потеплении на территории республики.

Вывод о гумидном потеплении подтверждается данными, полученными Н.М. Новиковой с соавторами (2020) в результате полевых исследований на мелиорированных солонцовых почвах Приергенинской равнины Калмыкии. Выполненные исследования показали, что на изучаемой территории формируются растительные сообщества, характерные для заключительных стадий восстановительной сукцессии не для солонцовых, а для светло-каштановых почв. Сказанное позволяет сделать методический вывод о том, что гидротермический коэффициент Селянинова (по сравнению с коэффициентом увлажнения) более достоверно отражает климатические условия территории, влияющие на состояние и развитие растительного покрова, и может быть рекомендован для оценки климатических условий в Республике Калмыкия.

Вопрос о том, насколько достоверно количественные показатели климата описывают гидротермические условия территории на региональном уровне, весьма актуален. Целью настоящей работы является оценка достоверности описания гидротермических условий территории Республики Калмыкия наиболее известными количественными показателями климата, при расчете которых используются данные о температуре воздуха и осадках, которые доступны в базах данных и широко используются в климатических моделях.

### Материалы и методы

Расчет количественных показателей климата для территории Республики Калмыкия за период 1966-2017 гг. выполнен на основе использования массивов данных по среднемесячной температуре воздуха и месячных сумм осадков на метеорологической станции Яшкуль (46° 11' с.ш., 45° 21' в.д., абсолютная высота – -7 м н.у.м. БС), включенной в Глобальную сеть наблюдений ВМО за климатом (Булыгина и др., 2019а, 2019б). Расположена метеорологическая станция на Чёрных землях – в самой засушливой части территории республики, отличающейся резко континентальным климатом.

Среднегодовое значение среднегодовой температуры воздуха за период 1966-2017 гг. составило 10.7°C (среднеквадратическое отклонение  $\sigma=1.0^\circ\text{C}$ , коэффициент вариации  $C_v=0.09$ ); среднегодовое значение годовой суммы осадков равна 267 мм ( $\sigma=61$  мм,  $C_v=0.23$ ).

В настоящей работе оцениваются гидротермические условия территории Республики Калмыкия на основе использования наиболее известных количественных показателей климата, а именно гидротермического коэффициента Селянинова, коэффициента увлажнения, индекса аридности Торнтвейта, метода Кёппена и схемы Холдриджа.

### Результаты и обсуждение

*Гидротермический коэффициент Селянинова.* Одним из наиболее часто используемых количественных показателей климата является гидротермический коэффициент Селянинова, характеризующий период со среднесуточными температурами воздуха выше 10°C (условно говоря, период вегетации). Гидротермический коэффициент, разработанный Г.Т. Селяниновым (1928) для климатических условий России, определяется по соотношению:

$$ГТК = \frac{10P_{>10}}{\sum T_{>10}} \quad (1),$$

где ГТК – гидротермический коэффициент;  $P_{>10}$  – сумма осадков за период со среднесуточными температурами воздуха выше 10°C, мм;  $\sum T_{>10}$  – сумма среднесуточных температур воздуха за тот же период, °C.

Недостатком этого показателя является то, что в числителе и знаменателе стоят величины разной размерности. Несмотря на это и на простоту, в большинстве случаев данный метод оценки гидротермических условий дает неплохие результаты (Будыко, 1956). По гидротермическим условиям Г.Т. Селяниновым (1958) выделяются семь природных зон, информация о которых показана в таблице 1.

**Таблица 1.** Значения гидротермического коэффициента Селянинова по природным зонам.

Природные зоны	Гидротермический коэффициент
Тайга	>1.6
Тайга и лиственные леса	1.6-1.3
Лесостепь	1.3-1.0
Типичная степь	1.0-0.7
Степь на южных черноземных и каштановых почвах	0.7-0.4
Полупустыня	0.4-0.2
Пустыня	<0.2

Динамика гидротермического коэффициента, рассчитанного по зависимости (1) с использованием материалов наблюдений метеорологической станции Яшкуль за временной интервал 1966-2017 гг., показана на рисунке 1, где в соответствии с таблицей 1 отмечены природные зоны пустыни, полупустыни и степи. Среднегодовое значение гидротермического коэффициента составило 0.44 при диапазоне его изменения в пределах от 0.11 до 0.83; среднеквадратическое отклонение равно  $\sigma=0.16$  коэффициент вариации равен  $C_v=0.36$ . В соответствии с таблицей 1, выявленный диапазон изменения гидротермического коэффициента за период 1966-2017 гг. соответствует природной зональности от пустыни до типичной степи. За рассматриваемый временной интервал в 2 случаях гидротермические условия территории соответствовали природной зоне пустынь, в 19 случаях – зоне полупустынь, в 31 случае – зоне степей. В межгодовом распределении гидротермического коэффициента прослеживается пока еще не достоверная тенденция его увеличения, что также может свидетельствовать о гумидном потеплении территории.

Вывод, сделанный на основании анализа динамики гидротермического коэффициента о гумидном потеплении на территории Республики Калмыкия, подтверждается данными о том, что на мелиорированных землях Приергенинской равнины происходит формирование растительных

сообществ, характерных для заключительных стадий восстановительной сукцессии для светло-каштановых почв (Новикова и др., 2020).

*Коэффициент увлажнения*, представляет собой «отношение количества атмосферных осадков к потенциальной величине суммарного испарения в данной экосистеме за год» (Экологическая ..., 2010). В «Метеорологическом словаре» (Хромов, Мамонтова, 1974) приведенное выше соотношение обозначено как «индекс Высоцкого». В некоторых работах данный коэффициент упоминается как коэффициент увлажнения Высоцкого-Иванова. Коэффициент увлажнения определяется по соотношению (Высоцкий, 1960):

$$KV=P/E_0 \quad (2),$$

где  $KV$  – коэффициент увлажнения,  $P$  – годовая сумма осадков, мм;  $E_0$  – годовая сумма испаряемости, мм.

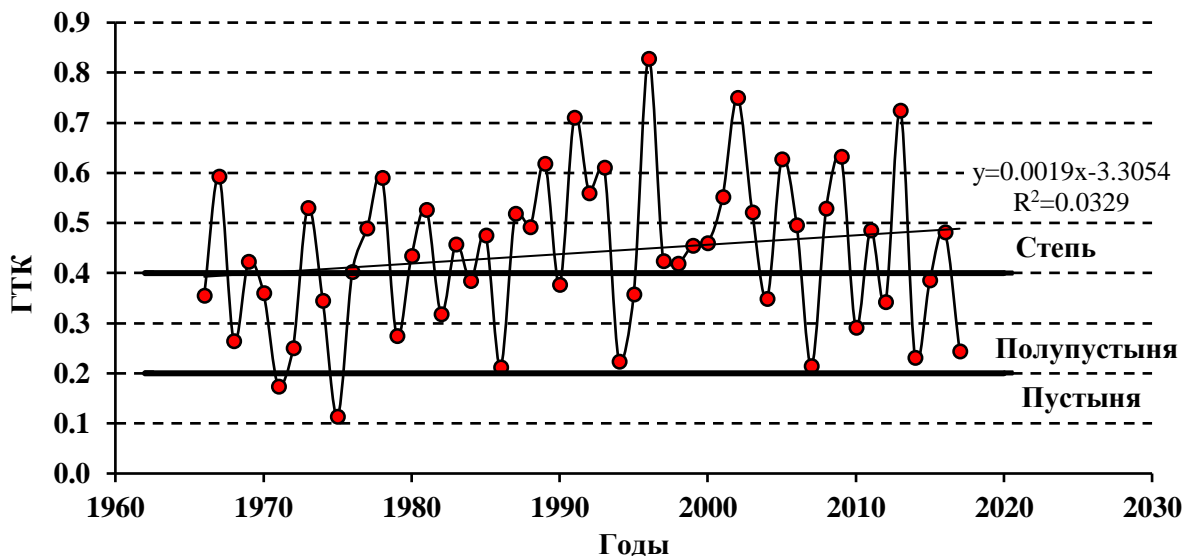


Рис. 1. Динамика гидротермического коэффициента ГТК.

Величина испаряемости, входящая в соотношение (2), представляет собой испарение в данной местности, не лимитированное запасами воды в почве и определяемое комплексом метеорологических условий. Существует большое число расчетных методов определения испаряемости, основанных на использовании метеорологических данных; методы различаются в зависимости от того, какое информационное обеспечение требуется для расчета испаряемости (Черенкова, Шумова, 2007). Кроме расчетных методов оценить испаряемость можно при помощи водных испарителей, используя эмпирические коэффициенты для приведения измеренных значений к значениям испаряемости.

С учетом того, что в данной работе мы ориентируемся на доступность данных, к которым относятся температура воздуха и осадки, для расчета годовых значений испаряемости используется соотношение (Шумова, 2010):

$$E_0=\alpha(\sum T_{>0}) \quad (3),$$

где  $E_0$  – испаряемость, мм;  $\sum T_{>0}$  – сумма среднесуточных положительных температур воздуха, °С;  $\alpha=0.28$ . Соотношение (3) удобно использовать для оценки испаряемости, когда информационное обеспечение сводится к данным о температуре воздуха, что обычно бывает при использовании баз метеорологических данных или данных климатических моделей.

В основе построения формулы (3) лежит модель суммарного испарения А.И. Будаговского (1964), согласно которой на основе комплекса метеорологических величин (температура воздуха, дефицит влажности воздуха, скорость ветра и радиационный баланс) значения испаряемости определяются по формуле, которая может быть записана в виде (Шумова, 2003):

$$E_{0 \text{ Будаговский}}=b_1D_0d+b_2R \quad (4),$$

$$b_1 = \frac{0.7}{1 + 1.56\varphi}, \quad b_2 = \frac{0.026\varphi}{1 + 1.56\varphi} \quad (5),$$

$$\varphi = \frac{24513}{(235 + T)^2} e^{\frac{17.1T}{235+T}} \quad (6),$$

$$D_\omega = \frac{c_1 \tilde{y}}{c_2 \tilde{y}^{1/2} + 1}, \quad \tilde{y} = u + 0.4 \quad (7),$$

где  $E_O$  Будаговский – испаряемость, мм/сут;  $b_1$  и  $b_2$  – функции температуры воздуха;  $\varphi$  – производная насыщающей упругости водяного пара от температуры воздуха, мб/°С;  $D_\omega$  и  $\tilde{y}$  – функции скорости ветра;  $T$  – среднесуточная температура воздуха, °С;  $d$  – среднесуточный дефицит влажности воздуха, мб;  $u$  – среднесуточная скорость ветра на высоте 2 м, м/сек;  $R$  – радиационный баланс, кал/(см<sup>2</sup>·сут.). Расчет испаряемости по зависимости (4) выполнен за безморозный период по материалам наблюдений 45 метеорологических станций лесостепной и степной зон России и частично выходящих за их пределы. Для этих же станций определены суммы среднесуточных температур воздуха за безморозный период. Коэффициент корреляции между рассчитанными по формуле (4) значениями испаряемости и соответствующими значениями сумм среднесуточных температур воздуха за безморозный период равен 0.79, что свидетельствует о приемлемой точности уравнения (3).

Н.Н. Иванов (1941) на основании коэффициента увлажнения выделил 5 природных зон (табл. 2).

**Таблица 2.** Значения коэффициента увлажнения по природным зонам.

Природные зоны	Коэффициент увлажнения
Лесная зона	1.0-1.5
Лесостепь	0.6-1.0
Степь	0.3-0.6
Полупустыня	0.1-0.3
Пустыня	<0.1

Значения коэффициента увлажнения, рассчитанного по зависимости (2) с использованием данных о температуре воздуха и осадках на метеорологической станции Яшкуль за временной интервал 1966-2017 гг., представлены на рисунке 2, где выделены природные зоны полупустыни и степи в соответствии с таблицей 2. При среднемноголетнем значении коэффициента увлажнения, равном 0.23, диапазон его изменения за исследуемый период находится в пределах от 0.13 до 0.33; среднеквадратическое отклонение равно  $\sigma=0.05$ , коэффициент вариации равен  $C_v=0.24$ . В соответствии с таблицей 2, диапазон изменения коэффициента увлажнения относится к природной зональности от полупустыни до степи; в 45 случаях из 52 климатические условия соответствуют зоне полупустыни, в 7 случаях – степи. В межгодовой динамике прослеживается незначимая тенденция увеличения гидротермического коэффициента, свидетельствующая все же о некотором повышении увлажненности территории за исследуемый период.

*Индекс аридности Торнтвейта.* Условные показатели климата Торнтвейта (Thornthwaite, 1948), к которым относятся индекс аридности, индекс гумидности и индекс влажности, наиболее распространены в США и Канаде; индексы Торнтвейта используются и в других странах, в том числе и в России.

Индекс аридности Торнтвейта определяется по соотношению (в записи условных обозначений, принятых в настоящей статье):

$$I_{a(\text{Торнт})} = 100 \frac{\sum (P - E_{\text{Торнт}})_{\text{при } P < E_{\text{Торнт}}}}{\sum E_{\text{Торнт}}} \quad (8),$$

где  $I_{a(\text{Торнт})}$  – индекс аридности;  $P$  – месячная сумма осадков, см/мес;  $E_{\text{Торнт}}$  – месячная сумма испаряемости, см/мес. При расчете индекса аридности учитываются месяцы, для которых месячная

сумма осадков меньше месячной суммы испаряемости.

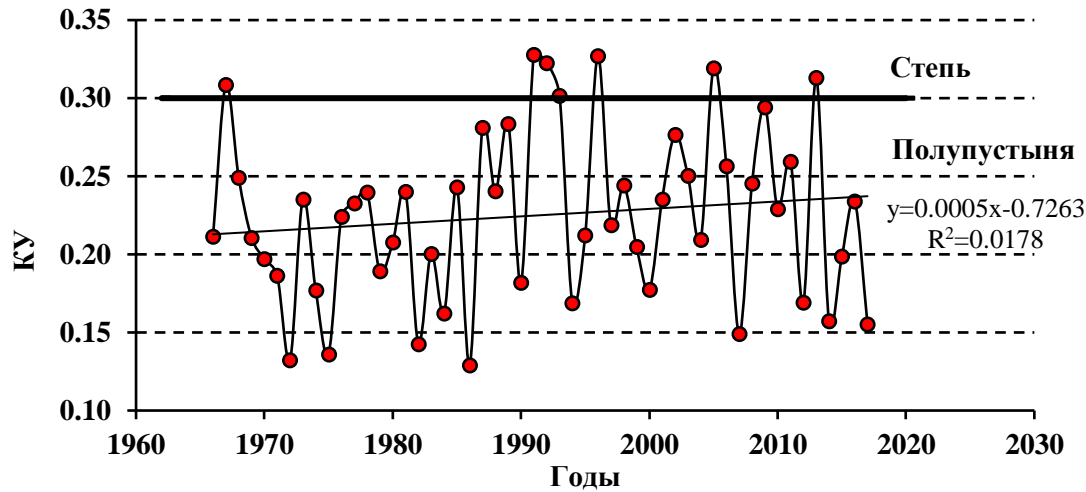


Рис. 2. Динамика коэффициента увлажнения КУ.

Для расчета месячной суммы испаряемости используется формула:

$$E_{Торнт} = 1.6(10T_{мес}/\Sigma I_{мес})^a \quad \text{при } T_{мес} > 0 \quad (9),$$

$$I_{мес} = (T_{мес}/5)^{1.514} \quad (10),$$

$$a = \frac{0.926}{2.42 - \log \Sigma I_{мес}} \quad (11),$$

где  $E_{Торнт}$  – испаряемость по Торнтвейту, см/мес;  $T_{мес}$  – среднемесячная температура воздуха, °С;  $I_{мес}$  – месячный индекс тепла, учитывающий поправку на широту. Расчет испаряемости проводится при условии, когда среднемесячная температурой воздуха превышает 0°С. Значения испаряемости, полученные по формуле (9), имеют размерность см/мес. Количественные значения индекса аридности Торнтвейта по природным зонам представлены в таблице 3 (Экологическая ..., 2010а).

Таблица 3. Значения индекса аридности Торнтвейта по природным зонам.

Природные зоны	$I_a(Торнт)$
Полупустыня	от -20 до -40
Пустыня	ниже -40
Сверхзасушливые регионы	ниже -57

Индекс гумидности Торнтвейта определяется по зависимости, аналогичной (8), с той разницей, что должно выполняться условие, когда  $P > E_{Торнт}$ :

$$I_{г(Торнт)} = 100 \frac{\sum (P - E_{Торнт})_{\text{при } P > E_{Торнт}}}{\sum E_{Торнт}} \quad (12),$$

где  $I_{г(Торнт)}$  – индекс гумидности.

Индекс влажности, положенный Торнтвейтом в основу классификации климатов, рассчитывается по соотношению:

$$I_{в(Торнт)} = \frac{100 \sum (P - E_{Торнт})_{\text{при } P > E_{Торнт}} - 60 \sum (P - E_{Торнт})_{\text{при } P < E_{Торнт}}}{\sum E_{Торнт}} \quad (13),$$

где  $I_{в(Торнт)}$  – индекс влажности.

Индекс аридности Торнтвейта, рассчитанный по зависимости (8) на основе данных по температуре воздуха и осадкам метеорологической станции Яшкуль за период 1966-2017 гг., представлен на рисунке 3. Среднее значение индекса аридности за исследуемый период составило -74

при диапазоне изменения от -90 до -52; среднеквадратическое отклонение равно  $\sigma=8$ , коэффициент вариации равен  $C_v=0.26$ . Согласно таблице 3, полученные значения индекса аридности Торнтвейта соответствуют природной зоне пустынь и сверхзасушливым регионам, к которым территория Калмыкии не относится по существующему физико-географическому районированию. В динамике индекса аридности отмечается незначимая отрицательная тенденция, свидетельствующая о повышении засушливости территории. Кроме того, отмеченная тенденция изменения индекса аридности Торнтвейта не соответствует климатическим изменениям, наблюдаемым в период 1966-2017 гг. на территории Калмыкии, поэтому данный метод оценки гидротермических условий не может быть рекомендован для климатических исследований на территории республики.

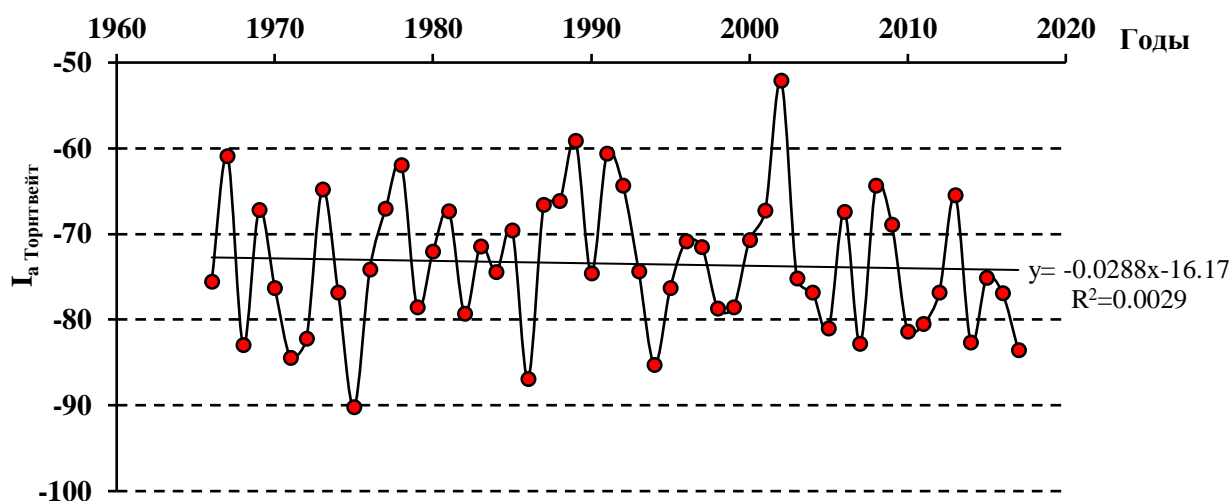


Рис. 3. Динамика индекса аридности Торнтвейта  $I_a$ (Торнтвейт).

**Метод Кёппена.** Для количественной характеристики сухого климата В.П.Кёппен использует соотношение между среднегодовой температурой воздуха и годовой суммой осадков с учётом сезонности увлажнения (Дроздов и др., 1989). Выделяется три типа сезонного увлажнения – это преобладание осадков холодного периода, преобладание осадков тёплого периода и равномерное распределение осадков в течение года. Тёплый период, в данном контексте в северном полушарии, продолжается с апреля по сентябрь включительно. Для каждого типа сезонного увлажнения установлены температурные границы, определяемые на основе среднегодовой температуры воздуха (табл. 4). В зависимости от выполнения соотношения между среднегодовой температурой воздуха и годовой суммой осадков, представленных в таблице 4, определяется природная зона (степь или пустыня). В отношении пустынь отметим, что в зависимости от среднегодовой температуры воздуха В.П. Кёппен различает «жаркие пустыни» (при среднегодовой температуре воздуха  $T > 18^\circ\text{C}$ ) и «холодные пустыни» (при  $T < 18^\circ\text{C}$ ).

Таблица 4. Соотношение между ресурсами тепла и влаги для сухих зон по иегоду Кёппена.

Сезонное увлажнение	Степи (семиаридный)	Пустыни (аридный)
Преобладание осадков холодного периода	$P \leq 2T$	$P < T$
Преобладание осадков тёплого периода	$T + 14 \leq P \leq 2T + 14$	$P < T + 14$
Равномерное распределение осадков в течение года	$T + 7 \leq P \leq 2(T + 7)$	$P < T + 7$

**Примечания к таблице 4:** T – среднегодовая температура воздуха,  $^\circ\text{C}$ ; P – годовая сумма осадков, см.

Среднемноголетнее значение среднегодовой температуры воздуха на метеорологической станции

Яшкуль за период 1966-2017 гг. составило  $10.7^{\circ}\text{C}$ , что по классификации В.П.Кёппена позволяет отнести исследуемую территорию к «холодной пустыне». Анализ месячных сумм осадков за период 1966-2017 гг. показал, что в Калмыкии осадки теплого периода (апрель-сентябрь) в среднем составляют 60% от годового количества, что позволяет считать распределение осадков в течение года равномерным; преобладанием осадков теплого или холодного периода считается, если они составляют 70% и более от их годовых значений. Исходя из этого, в настоящей работе для оценки гидротермических условий в Калмыкии используется выражение  $T+7 \leq P \leq 2(T+7)$ , которое соответствует равномерному распределению осадков в течение года.

Графическое изображение выражения  $T+7 \leq P \leq 2(T+7)$ , выполненное на основе данных о среднегодовых температурах воздуха и годовых сумм осадков на метеорологической станции Яшкуль за период 1966-2017 гг., представлено на рисунке 4. На рисунке 4 показаны температурные границы  $T+7$  и  $2(T+7)$ , а также представлены значения годовых сумм осадков. В соответствии с приведенным выше выражением, если точки, обозначающие годовую сумму осадков, располагаются внутри температурных границ  $T+7$  и  $2(T+7)$ , то это указывает на гидротермические условия, характерные для степной зоны. Если точки, обозначающие годовую сумму осадков, расположены ниже температурной границы  $T+7$ , то такие гидротермические условия присущи зоне пустыни. Точки, обозначающие годовую сумму осадков, которые расположены выше температурной границы  $2(T+7)$ , свидетельствуют об экстремально высоких осадках и соответствующей им увлажненности территории в эти годы.

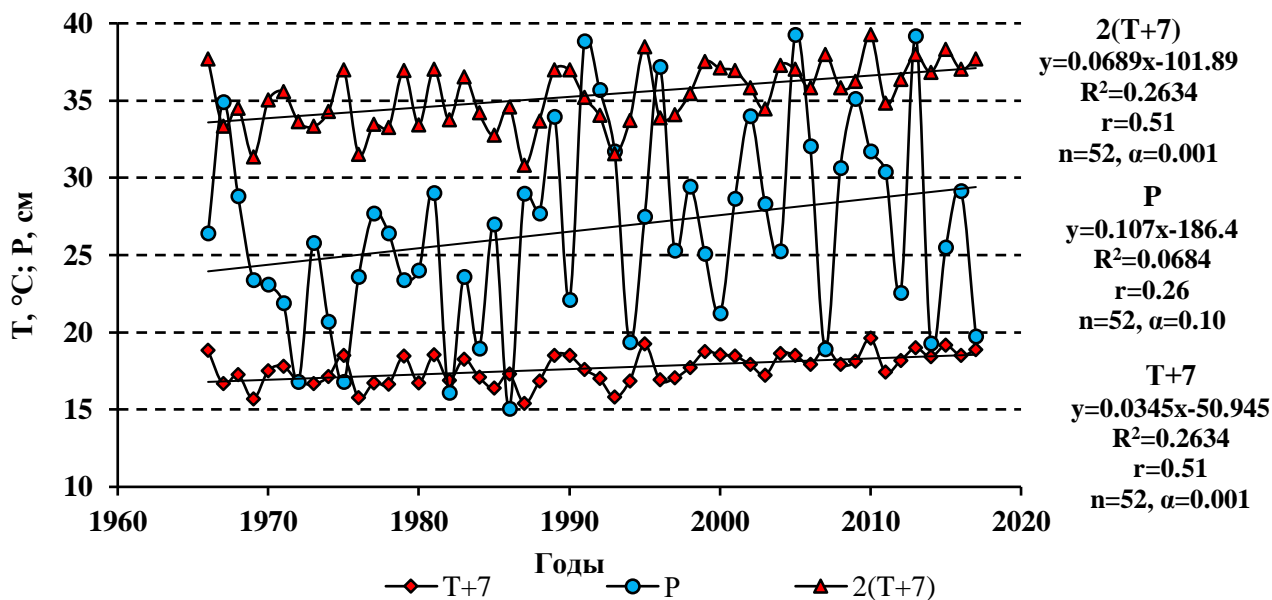


Рис. 4. Динамика гидротермических условий сухих зон по Кёппену.

На основе анализа данных, полученных с использованием метода В.П. Кёппена, можно сделать вывод о том, что на исследуемой территории в период 1966-2017 гг. в 41 случае из 52 наблюдались гидротермические условия, соответствующие природной зоне степей, в 4 случаях – зоне пустынь, в 7 случаях отмечены гидротермические условия, присущие более увлажненным территориям. В динамике годовых температурных характеристик и годовых сумм осадков за период 1966-2017 гг. отмечаются достоверные положительные тренды, свидетельствующие о гумидном потеплении. Данный метод отличается простотой и достоверностью.

*Схема Холдриджа.* В 1990-х годах схема природных зон Холдриджа была рекомендована и широко применялась при оценке уязвимости природных зон и их границ при возможном изменении климата (Guidance ..., 1994). Для оценок с использованием данной схемы необходимо располагать данными о температуре воздуха и осадках. Входными параметрами схемы является значение годовой суммы осадков, среднегодовая биотемпература и эвапотранспирационное отношение, показывающее степень засушливости территории и представляющее собой отношение годовой суммы испаряемости



к годовой сумме осадков. Использование осадков пояснения не требует. Биотемпература определяется по зависимости (Holdridge, 1959):

$$T_{bio} = \frac{\sum T_{cp.мес}}{12} \quad (14),$$

где  $T_{bio}$  – биотемпература, °С;  $T_{cp.мес}$  – среднемесячная температура воздуха, °С. При расчете биотемпературы суммируются только месяцы с положительной среднемесячной температурой воздуха, отрицательные температуры воздуха при суммировании принимаются равными нулю.

Эвапотранспирационное отношение рассчитывается по формуле

$$I_{Холдридж} = \frac{E_{0.Холдридж}}{P_{год}} \quad (15)?$$

где  $I_{Холдридж}$  – эвапотранспирационное отношение;  $E_{0.Холдридж}$  – испаряемость, мм/год;  $P_{год}$  – осадки, мм/год.

Испаряемость определяется по формуле:

$$E_{0.Холдридж} = 58.93T_{bio} \quad (16).$$

На основании данных о температуре воздуха и осадках на метеорологической станции Яшкуль за период 1966-2017 гг. для каждого года были рассчитаны биотемпература и эвапотранспирационные отношения. На рисунке 5 показана динамика эвапотранспирационного отношения за исследуемый период, рассчитанного по зависимости (15). Среднее значение эвапотранспирационного отношения Холдриджа за исследуемый временной интервал составило 2.71 при диапазоне изменения от 1.75 до 4.44; среднеквадратическое отклонение равно  $\sigma=0.70$ , коэффициент вариации равен  $C_v=0.26$ .

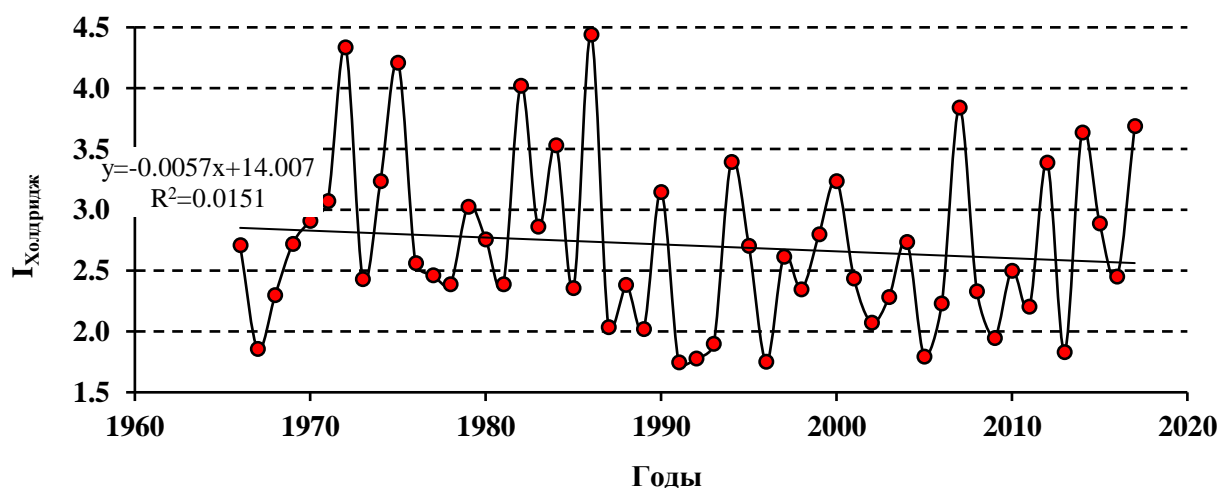


Рис. 5. Динамика эвапотранспирационного отношения Холдриджа.

Наблюдаемая пока еще недостоверная отрицательная тенденция в динамике эвапотранспирационного отношения Холдриджа свидетельствует об уменьшении засушливости территории. Эта выявленная тенденция уменьшения эвапотранспирационного отношения Холдриджа полностью соответствует климатическим изменениям, а именно гумидному потеплению, наблюдаемому в период 1966-2017 гг. на территории Калмыкии, поэтому данный метод оценки гидротермических условий по-видимому может быть использован для климатических исследований на территории республики.

Схема природных зон Холдриджа (рис. 6) представляет собой треугольник, внутри которого расположен массив шестиугольников с обозначением природных зон (Life Zone). Боковые стороны треугольника являются осями координат: правая ось – это значение годовой суммы осадков (Average Total Annual Precipitation), левая – эвапотранспирационное отношение (Potential Evapotranspiration Ratio). Вертикальные оси, расположенные слева и справа от треугольника, являются осями среднегодовой биотемпературы (Mean Annual Biotemperature).

На основании вычисленных по формуле (14) значений биотемпературы и значений эвапотранспирационного отношения по формуле (15), а также имеющихся данных по осадкам, по схеме Холдриджа (рис. 6) были определены природные зоны, соответствующие трём указанным входным параметрам схемы. В соответствии со схемой Холдриджа за временной интервал 1966-2017 гг. гидротермические условия исследуемой территории соответствовали зонам-шестиугольникам: зоне степей (Steppe) – 15 случаев; зоне колючекустарниковых степей (Thorn Steppe) – 10 случаев; зоне кустарниковых пустынь (Desert Bush) – 27 случаев. Приведенные данные, в совокупности с отрицательной тенденцией эвапотранспирационного отношения, свидетельствуют о гумидном потеплении исследуемой территории.

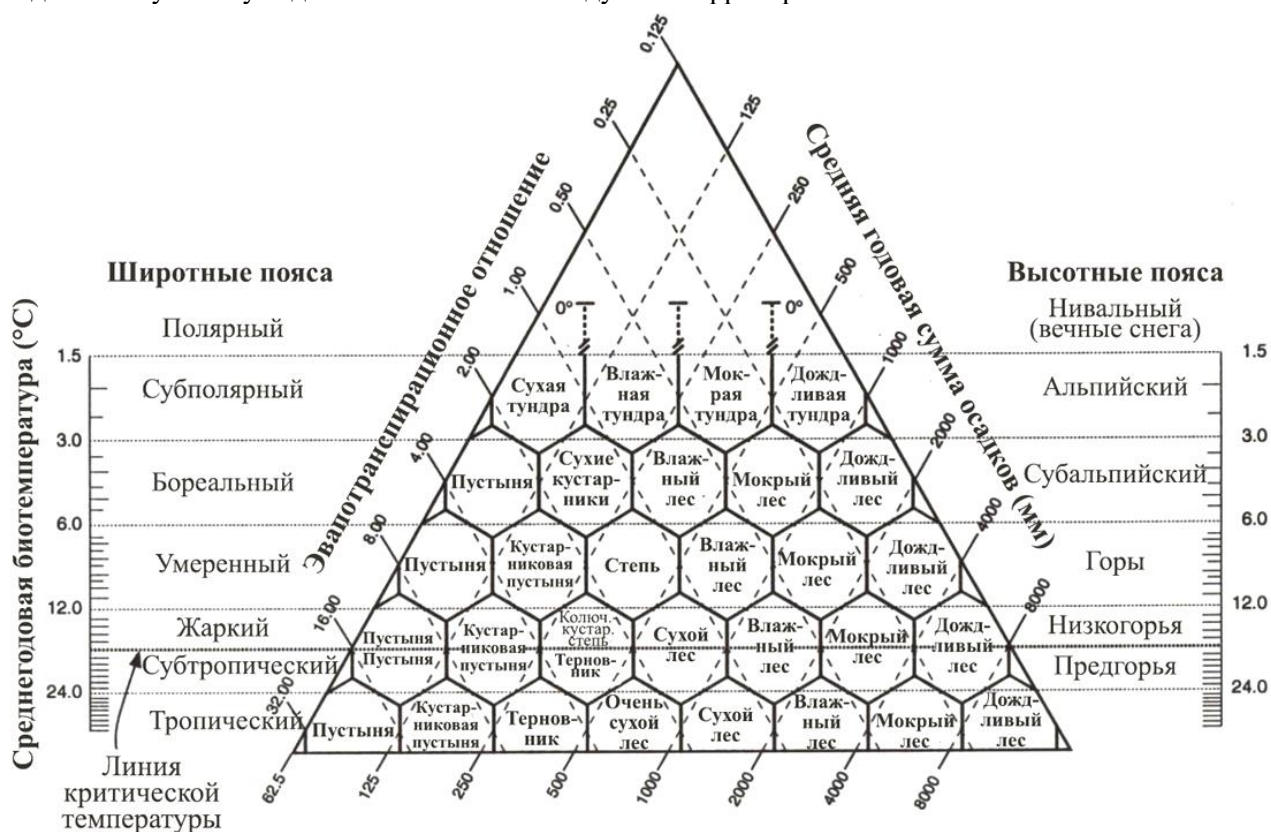


Рис. 6. Схема природных зон (Life Zone) по Холдриджу (Holdridge, 1967).

Представление о числе случаев соответствия природным зонам количественных показателей климата, рассчитанных разными методами с использованием массива данных метеорологической станции Яшкуль за период 1966-2017 гг., даёт таблица 5. При её построении годы, в которые гидротермические условия соответствовали зоне пустынь и полупустынь, были объединены в одну группу; к другой группе – степь – были отнесены годы, по гидротермическим условиям отнесенные к различным типам степей.

Таблица 5. Природные зоны, определённые на основе количественных показателей климата разных авторов (число случаев, %).

Количественные показатели климата	Природные зоны	
	Пустыня и полупустыня	Степь
Гидротермический коэффициент Селянинова	40	60
Коэффициент увлажнения	87	13
Индекс аридности Торнтвейта	100	0
Метод Кёппена	8	92

Схема Холдриджа	52	48
-----------------	----	----

### Выводы

От выбора количественного показателя климата зависит достоверность результатов оценки динамики гидротермических условий территории на региональном уровне как в условиях современного климата, так и при использовании климатических моделей, дающих представление о направлении и масштабах возможного изменения климата.

На основании проведённых исследований можно сделать вывод, что из пяти рассмотренных подходов только четыре с разной степенью достоверности оценивают гидротермические условия и их динамику на территории Республики Калмыкия: это гидротермический коэффициент Селянинова, коэффициент увлажнения, метод Кёппена и схема Холдриджа.

Результаты оценок гидротермических условий республики, полученные с использованием индекса аридности Торнтвейта, недостоверны, так как характеризуют период 1966-2017 гг. как период усиления аридизации климата, что не соответствует современным климатическим условиям изучаемой территории.

Наиболее достоверными оценками гидротермических условий и их динамики на территории Республики Калмыкия можно признать оценки, выполненные на основании гидротермического коэффициента Селянинова и метода Кёппена, достоверность которых подтверждается материалами полевых исследований изменения растительности на мелиорированных землях Приергенинской равнины за 10 лет.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Будаговский А.И.* 1964. Испарение почвенной влаги. М.: Наука. 242 с.
- Будыко М.И.* 1956. Тепловой баланс земной поверхности. Л.: Гидрометеиздат. 256 с.
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коришнова Н.Н., Швец Н.В.* 2019а. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394 [Электронный ресурс <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения 04.09.2019)].
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В.* 2019б. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485 [Электронный ресурс <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных> (дата обращения 04.09.2019)].
- Высоцкий Г.Н.* 1960. Избранные труды. М.: Сельхозгиз. 435 с.
- Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В., Раевский А.Н., Смекалова Л.К., Школьный Е.П.* 1989. Климатология. Л.: Гидрометеиздат. 568 с.
- Иванов Н.Н.* 1941. Зоны увлажнения земного шара // Известия АН СССР. Серия география и геофизика. № 3. С. 261-288.
- Новикова Н.М., Волкова Н.А., Уланова С.С., Чемидов М.М.* 2020. Изменение растительности на мелиорированных солонцовых почвах Приергенинской равнины за 10 лет (Республика Калмыкия) // Аридные экосистемы. Т. 26. № 3 (84). С. 30-39. [Novikova N.M., Volkova N.A., Ulanova S.S., Chemidov M.M. 2020. Change in Vegetation on Meliorated Solonchic Soils of the Peri-Yergenic Plain over 10 Years (Republic of Kalmykia) // Arid Ecosystems. Vol. 10. No. 3. P. 194-202.]
- Селянинов Г.Т.* 1928. О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. Вып. 20. С. 165-177.
- Селянинов Г.Т.* 1958. Принципы агроклиматического районирования СССР // Вопросы агроклиматического районирования СССР. М.: МСХ СССР. С. 7-14.
- Справочник по показателям и индексам засушливости. 2016. 53 с. [Электронный ресурс [https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP-Drought-Indices\\_ru\\_2016.pdf](https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP-Drought-Indices_ru_2016.pdf) (дата обращения 15.02.2021)].
- Хромов С.П., Мамонтова Л.И.* 1974. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат. 568 с.
- Черенкова Е.А., Шумова Н.А.* 2007. Испаряемость в количественных показателях климата // Аридные экосистемы. Т. 13. № 33-34. С. 57-69.
- Шумова Н.А.* 2020. Анализ климатических условий в Республике Калмыкия за 1966-2017 гг. // Аридные экосистемы. Т. 26. № 3 (84). С. 23-29. [Shumova N.A. 2020. Analysis of Climatic Conditions in the Republic of Kalmykia for 1966-2017 // Arid Ecosystems. Vol. 10. No. 3. P. 188-193.]
- Шумова Н.А.* 2010. Закономерности формирования водопотребления и водообеспеченности агроценозов в

условиях юга Русской равнины. М.: Наука. 239 с.

*Шумова Н.А.* 2003. Оценка точности модели для расчета динамики запасов воды в почве // *Метеорология и гидрология*. № 10. С. 124-133.

*Шумова Н.А.* 2007. Оценка уязвимости гидротермических условий и зональных границ аридных территорий при различных сценариях изменения климата // *Аридные экосистемы*. Т. 13. № 32. С. 34-46.

*Экологическая энциклопедия*: в 6 т. 2010а. Т. 2. Г-И. М.: Энциклопедия. 448 с.

*Экологическая энциклопедия*: в 6 т. 2010б. Т. 3. И-М. М.: Энциклопедия. 448 с.

*Guidance for Vulnerability and Adaptation Assessments*. 1994. US Country studies program. Washington, D.C., US Country Studies Management Team (PO-63). 518 p.

*Holdridge L.R.* 1959. Simple Method for determining Potential Evapotranspiration from Temperature Data // *Science*. No. 130. P. 572.

*Holdridge L.R.* 1967. Life zone ecology. San Jose: Tropical Science Center. 206 p.

*Thornthwaite C.W.* 1948. An Approach Toward a Rational Classification of Climate // *Geographical Review*. Vol. 38. P. 55-94.