

О СРАВНИМОСТИ НЕКОТОРЫХ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗАСУХИ

Е.А. Черенкова, А.Н. Золотокрылин

Институт географии РАН,
РФ, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29; *lcherenkova@marketresearch.ru*

Резюме. В статье проанализированы наиболее известные отечественные и зарубежные количественные показатели засух. Установлено, что на Европейской части России южнее 55 ° с. ш. наиболее тесная связь временных рядов гидротермического коэффициента (ГТК) наблюдается со стандартизованным индексом осадков (SPI) и стандартизованным индексом осадков и испаряемости (SPEI). Однако высокие коэффициенты корреляции между временными рядами показателей, отражающих и засушливость, и переувлажнение, не гарантируют одинаковую интерпретацию характеристик засух. Выявлено, что ГТК по сравнению с другими показателями существенно завышает повторяемость засух в период активной вегетации практически на всей территории исследования. Предложена новая методика определения градаций интенсивности засух по ГТК, повышающая сравнимость характеристик засух при использовании индексов ГТК и SPI.

Ключевые слова. Количественные показатели засухи, гидротермический коэффициент, стандартизированный индекс осадков, Европейская часть России.

ON THE COMPARABILITY OF SOME QUANTITATIVE DROUGHT INDICES

E.A. Cherenkova, A.N. Zolotokrylin

Institute of Geography Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetny lane, 119017, Moscow, Russia; *lcherenkova@marketresearch.ru*

Summary. Quantitative indices of drought most widely used in Russia and abroad are analyzed in the paper. It is found that in the European part of Russia south of 55 N, the Hydrothermal Coefficient (HTC) time series has the highest correlation with Standardized Precipitation Index (SPI) time series and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). However, despite the high correlation between the time series of aridity indices, they interpret drought events differently. HTC significantly overstates the frequency of drought during the active vegetation season in the most of the study area as compared with other indices. A new method for the definition of drought intensity gradations using HTC data is proposed. The proposed procedure helps improve the comparability of droughts' characteristics while using the HTC and SPI data.

Keywords. Quantitative indices of drought, Hydrothermal coefficient, Standardized Precipitation Index, European part of Russia.

Введение

Пристальное внимание как отечественных, так и зарубежных исследователей к изучению характеристик увлажнения связано, прежде всего, с тем, что его экстремумы (особенно засухи) способны наносить значительный ущерб обществу. Экстремальность климата (увлажнения) возрастает в условиях глобального потепления (IPCC, 2013). Для России мониторинг засушливых явлений приобретает особую актуальность, поскольку значительная часть земель, находящихся в сельскохозяйственном обороте, располагается в зоне неустойчивого и недостаточного увлажнения.

До сих пор не существует признанного количественного показателя засухи. Каждый используемый показатель рассматривает ситуацию с засушливыми условиями с определенной точки зрения. Отсюда следует, что возможности единого подхода к сравнению результатов на основе применения различных показателей засух ограничены. Отечественными показателями засух при определении ее интенсивности, прежде всего, учитывается влияние на снижение урожайности; также используются оценки различных метеопараметров (например, дефицит осадков по сравнению с нормой). Разработка таких критериев началась еще в 50-х – 60-х годах прошлого века (Алпатьев, Иванова, 1958; Процеров, 1950; Руденко, 1958 и многие другие). В современной отечественной практике Гидрометслужбы в качестве количественного показателя засух широко используется гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова (ГТК) (Селянинов, 1928), характеризующий соотношение тепла и влаги. При этом интерпретация градаций засух основывается на предлагаемых эмпирических оценках с возможностью последующей их корректировки с учетом агроклиматической зоны. Принятые за рубежом количественные показатели засух используют более строгий математический подход при определении ее интенсивности, обосновывающий сопоставимость значений вне зависимости от географической привязки.

Цель статьи состоит в разработке методики определения градаций интенсивности засух по ГТК, повышающей сравнимость его оценок характеристик засух со стандартизованным индексом осадков (SPI) на европейской части России.

Предлагаемая методика направлена на усовершенствование ГТК-оценки засух, не зависящей от агроклиматической зоны, а также на повышение сопоставимости характеристик засух по сравнению с зарубежными показателями. Актуальность обусловлена возросшим интересом к использованию зарубежных количественных показателей засух наряду с отечественными показателями.

Материалы и методы

Фокус исследования направлен на выявление сильных засух в сезон активной вегетации с мая по июль в период 1936 – 2012 гг. на равнинной

территории европейской части России южнее 55 ° с.ш., включающей основные зернопроизводящие области европейского зернового пояса РФ. Для изучения характеристик засухи были привлечены различные известные количественные показатели.

В качестве отечественного показателя засух, рассмотрен наиболее востребованный в отечественной гидрометеорологической практике гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова, значения которого определяются по формуле:

$$ГТК = P / 0.1 \cdot T_{>10^{\circ}C} , \tag{1}$$

где $T_{>10^{\circ}C}$ – сумма средних суточных температур воздуха за период с температурами воздуха выше 10 °С, P – количество осадков за тот же период.

Для летних месяцев сумма средних суточных температур за период между датами перехода температуры через 10 °С, уменьшенная в 10 раз, тесно коррелирует с испарением с оптимально увлажненного поля и может быть принята за величину максимально возможного испарения при существующих атмосферных условиях (т.е. испаряемость) (Селянинов, 1958). Этот факт также подтверждается измерениями суммарной испаряемости в летние месяцы с помощью эвапорметра Вильда (Бучинский, 1976). При всех очевидных достоинствах методика оценки интенсивности засухи по данным ГТК (Страшная и др., 2015) имеет существенный недостаток, поскольку градации интенсивности засух определены для зернопроизводящих районов в целом без учета зон увлажнения.

Для расчета ГТК использованы данные среднесуточных температур воздуха и суточных сумм осадков из климатического архива наблюдений на метеорологических станциях сети Росгидромет (доступных на интернет-сайте ВНИИГМИ-МДЦ - <http://www.meteo.ru>), из которых 54 метеостанции расположены в исследуемом регионе. В рассмотрение принимались временные ряды, в которых пропуски составили не более 10 %. ГТК рассчитывался за каждый месяц с мая по июль.

Таблица 1. Классификация засух на основе индексов ГТК, SPI, SPEI и PDSI

Интенсивность засухи	ГТК	SPI, SPEI	PDSI
слабая	$0.8 < ГТК \leq 1$	$-1 < SPI, SPEI \leq 0$	$-2 < PDSI \leq -1$
умеренная	$0.6 < ГТК \leq -0.8$	$-1.5 < SPI, SPEI \leq -1$	$-3 < PDSI \leq -2$
сильная	$0.3 < ГТК \leq 0.6$	$-2 < SPI, SPEI \leq -1.5$	$-4 < PDSI \leq -3$
экстремальная	$ГТК \leq 0.3$	$SPI, SPEI \leq -2$	$PDSI \leq -4$

Засуха идентифицировалась согласно классификации, описанной в работе (Уланова, 1988, см. табл. 1). При сравнении характеристик засух в период XX-го - начала XXI-го века основной акцент был сделан на рассмотрении периода исследования, начиная с 1936 г. в связи с активным расширением сети метеорологических станций на европейской части России во второй половине 30-х годов XX-го века. Репрезентативность проведенных в этот период оценок представляется существенно более высокой, чем в период до 1936 г. Сред-

немноголетние значения повторяемости засух были рассчитаны за базовое тридцатилетие 1961 – 1990 гг., рекомендованного Всемирной Метеорологической Организацией (ВМО).

В качестве зарубежных количественных показателей засухи были рассмотрены наиболее широко известные за рубежом индекс суровости засухи Палмера (PDSI, Palmer Drought Severity Index), стандартизованный индекс осадков SPI (Standardized Precipitation Index) и стандартизованный индекс осадков и испаряемости SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index). Изменения среднемесячного «самокалибрующегося» PDSI в период 1936 – 2012 гг. анализировались по данным из глобального сеточного архива Университета Восточной Англии пространственного разрешения $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (van der Schrier et al., 2006). Индекс Палмера рассчитывается по метеорологическим данным (месячным значениям температуры и осадков), а также локальным константам влагоемкости почвы. Данные используются для оценки составляющих водного баланса на поверхности почвы по упрощенной схеме влагопереноса в почве. При этом потенциальная эвапотранспирация определяется по методу Пенмана (Penman, 1948), в котором кроме приземной температуры воздуха используется радиационный баланс, а также скорость ветра и дефицит водяного пара на высоте 2 м. Расчет PDSI основан на применении совокупности эмпирических зависимостей, отражающих региональные запасы влаги, стандартизированные по отношению к локальной климатической норме. Для учета кумулятивного эффекта продолжительных периодов дефицита влаги используется рекурсивная двухэтапная процедура построения индекса, т.е. его значение на определенном временном интервале зависит от его значения на предыдущем шаге. Полученный в итоге стандартизованный индекс Палмера оценивает 4 градации засух на выбранной территории от слабой засухи до экстремальной засухи (перечислены в табл. 1). Более подробное описание процедуры получения индекса Палмера приведено в работе (Черенкова, 2013).

Стандартизованный индекс осадков SPI, рекомендованный ВМО для мониторинга засух (WMO, 2009), в отличие от имеющего месячное разрешение индекса PDSI, может быть рассчитан с разрешением от одного месяца и более. Тем самым появляется возможность выявления различных типов засух по их последствиям.

Алгоритм получения индекса SPI состоит в следующем (более подробное описание приведено в (Edwards, McKee, 1997)). Для каждой точки исследуемой территории (для метеостанции или узла сетки) по данным сумм осадков (наблюденных или смоделированных, в зависимости от задачи) на основе эмпирической функции распределения строится функция гамма-распределения (которая наилучшим образом характеризует функцию распределения количества осадков), имеющая вид:

$$f_{\alpha,\beta}(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, x > 0 \quad (2).$$

где $\alpha > 0$ – параметр формы, $\beta > 0$ – параметр масштаба, $x > 0$ – количество осадков, Γ – гамма-функция Эйлера, по определению равная:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (3)$$

Параметры функции плотности вероятности гамма-распределения (α и β) оцениваются для каждой метеостанции и выбранного временного шага с помощью уравнений, предложенных в работе (Thorn, 1966):

$$\tilde{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right); \tilde{\beta} = \frac{\bar{x}}{\tilde{\alpha}} \quad (4)$$

где:

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(\bar{x})}{n} \quad (5)$$

n – число наблюдений за осадками, участвующих в расчетах.

Полученные параметры используются для нахождения кумулятивной вероятности наблюдаемых осадков для заданного периода (месяца или более) и выбранного временного шага для каждой участвующей в расчетах метеостанции (или для каждого узла сетки в случае, если расчет индекса проводится по данным сеточного архива). При этом кумулятивная вероятность определяется по формуле:

$$G(x) = \int_0^x f(x) dx \quad (6)$$

Поскольку гамма-распределение не определено для $x=0$, кумулятивная вероятность преобразуется по формуле:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (7)$$

где $q = P(x=0) > 0$, где $P(x=0)$ – вероятность нулевых осадков.

Полученная кумулятивная вероятность $H(x)$ преобразуется далее с использованием обратной функции Гаусса к вероятности нормально распределенной случайной величины Z с нулевым средним и дисперсией, равной единице, которая и является значением SPI (Guttman, 1998). В работе (Эколого-географические ..., 2011) было показано, что такое преобразование возможно. Отметим также, что примененная процедура представляет собой равновероятное преобразование (Panofsky, Brier, 1958). Характерной чертой трансформации равновероятности является то, что вероятность случайной величины быть меньше заданного значения, полученного при помощи кумулятивной вероятности, должна быть такой же, как вероятность случайной величины быть меньше, чем соответствующее значение, полученное при помощи нормального распределения. Проведенные преобразования позволяют сделать данный показатель сравнимым в любых точках его расчета (McKee et al., 1993). Интенсивность засухи по данным SPI определяется согласно приведенным в табл. 1 градациям. Необходимо отметить, что вопрос выявления типа распределения, наилучшим образом характеризующего функцию распределения количества осадков, по-прежнему остается открытым, поскольку математическая статистика не дает однозначного ответа на этот вопрос. Так, в исследованиях для описания осадков были использованы различные функции распределения, такие, как, экспоненци-

альное, Вейбулла, Пуассона (например, Madsen et al., 1998; Thorn, 1966). В работе (Guttman, 1999) на основе сравнения различных функций распределения сделан вывод, что распределение количества осадков наилучшим образом описывает функция распределения Пирсона III типа (или гамма распределение).

При выборе данных сумм осадков мы исходили из того, что одними из наиболее надежных архивов данных осадков на территории России, на наш взгляд, является архив наблюдений на метеорологических станциях сети Росгидромета, поддерживаемый во ВНИИГМИ-МЦД, а также архивы Университета Восточной Англии (Climatic Research Unit, в данном исследовании использован архив данных CRU TS3.21 (Harris et al., 2013)). Архивы данных созданы на основе данных наземных наблюдений, полученных из национальных метеослужб, и интерполированных в узлы сетки пространственного разрешения $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Авторам неизвестны готовые архивы данных одномесячного индекса SPI, рассчитанных на основе данных осадков указанных архивов, поэтому значения одномесячного стандартизованного индекса SPI за май, июнь и июль в период 1936 – 2012 гг. были рассчитаны для настоящего исследования. Все коэффициенты корреляции между временными рядами осадков и соответствующих им временными рядами рассчитанного индекса SPI на территории исследования продемонстрировали значения не менее 0.96.

Засуха, выявленная с помощью SPI, характеризуется с точки зрения дефицита осадков, но не учитывает другие важные факторы влияния на ее характеристики. В частности, с помощью этого индекса невозможно выявить воздействие температуры на засуху и определить роль «волн жары» в численных экспериментах на глобальных моделях климата, оценивающих глобальное потепление.

Стандартизованный индекс осадков и испаряемости SPEI при оценке условий увлажнения принимает во внимание не только осадки, но и такой важный фактор, как испаряемость. Для расчета значений SPEI оценивается функция плотности лог-логистического распределения (которое наилучшим образом характеризует функцию распределения значений разности осадков и испаряемости):

$$F_{\alpha, \beta, \gamma}(D) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{D - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (8)$$

где α – параметр формы, β – параметр масштаба, γ – параметр местоположения, D – разность ($P - E_0$), где P – сумма осадков за выбранный период, E_0 – суммарная потенциальная испаряемость (по методу Пенмана) за тот же период. Более подробное описание алгоритма расчета индекса приведено в работе (Beguería et al., 2014). Отметим, что процедуры получения индексов SPI и SPEI аналогичны.

SPEI, рассчитываемый для периодов различной длины, начиная от 1-го месяца, показывает, насколько 3-х параметрическая функция лог-логистического распределения отклоняется от нормального распределения. В общем случае, лог-логистическое распределение является распределением вероятности переменной, чей логарифм имеет логистическое распределение. В исследовании использованы средние за месяц значения одномесячного стандартизованного индекса осадков и испаряемости SPEI (Standardized

Precipitation Evapotranspiration Index) из архива данных индекса Пиренейского Института Экологии (Instituto Pirenaico de Ecologia (Begueria et al. 2013)) пространственного разрешения $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, полученного на основе данных Climatic Research Unit (CRU) TS3.10.01 в период 1901 – 2012 гг. Интенсивность засухи по данным SPEI определяется аналогично SPI (табл. 1).

Предлагаемая в данном исследовании методика была апробирована не только для данных ГТК месячного разрешения с мая по июль, но и для ГТК за периоды с мая по июнь и с мая по июль. Градации умеренной, сильной и экстремальной засухи рассчитаны согласно методике для каждой рассмотренной метеостанции. В статье для описания методики определения градаций интенсивности засух по ГТК решено было ограничиться рассмотрением сильной засухи в июне.

Использованная в работе временная шкала с шагом в один месяц позволяет трактовать выявленные засухи как атмосферные по всем используемым показателям. Анализ более длительных временных интервалов позволяет выявить с помощью некоторых из рассмотренных показателей и другие типы засух (атмосферно-почвенную и гидрологическую). Статистическая значимость результатов определялась на основе применения t-test Стьюдента для временных рядов разной длины.

Обсуждение результатов

Как следует из табл. 2, в изучаемом регионе наибольшая теснота связи временных рядов ГТК с мая по июль в период 1936 – 2012 гг. наблюдается с индексами SPI и SPEI. Результат подтверждает выводы, полученные ранее относительно согласованности временных рядов ГТК и SPI (Страшная и др., 2015). Сравнение засухи по ГТК и другим отечественным показателям было проведено в работе (Золотокрылин и др., 2007).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между показателями атмосферной засушливости, осредненными в пределах исследуемой территории в мае (I), июне (II) и июле (III) в период 1936 – 2012 гг.¹⁾

Показатели	ГТК			SPI			SPEI			PDSI		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
ГТК	1	1	1	0.83	0.91	0.91	0.77	0.85	0.83	<i>0.44</i>	<i>0.54</i>	<i>0.48</i>
SPI	0.83	0.91	0.91	1	1	1	0.89	0.88	0.86	<i>0.5</i>	<i>0.57</i>	<i>0.49</i>
SPEI	0.77	0.85	0.83	0.89	0.88	0.86	1	1	1	<i>0.54</i>	<i>0.6</i>	<i>0.55</i>
PDSI	<i>0.44</i>	<i>0.54</i>	<i>0.48</i>	<i>0.5</i>	<i>0.57</i>	<i>0.49</i>	<i>0.54</i>	<i>0.6</i>	<i>0.55</i>	1	1	1

¹⁾ Статистически незначимые результаты отмечены курсивом

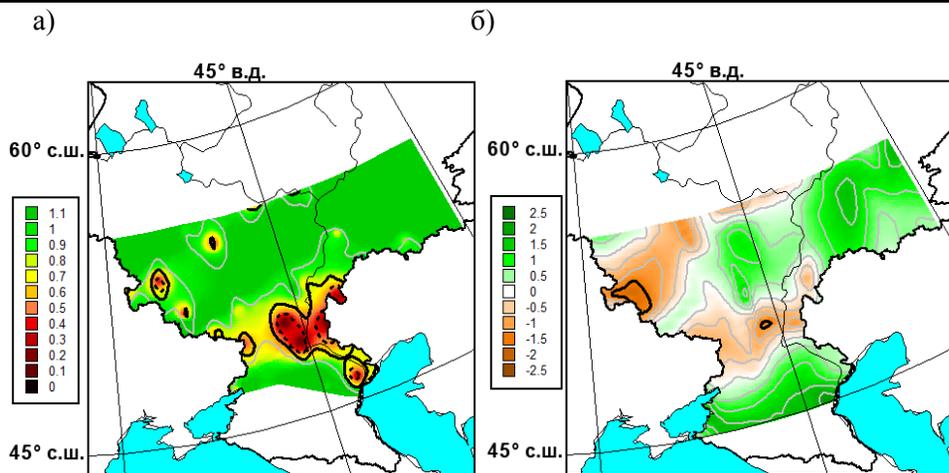


Рисунок 1. Пространственное распределение ГТК (а) и одномесячного SPI (б) в июне 2002 г. *Сплошной линией черного цвета выделены области сильной засухи, пунктирной линией – экстремальной засухи.*

Однако высокие коэффициенты корреляции между временными рядами показателей, отражающих и засушливость, и избыток увлажнения, не гарантируют одинаковую интерпретацию характеристик засух. При сравнении повторяемости засух по весьма сходным по характеру изменений показателям можно получить отличающиеся результаты пространственного и временного распределения засух. Так, например, поскольку в основе расчета значений ГТК и SPI используются осадки, оба показателя достаточно согласованно отражают общие черты территориального распределения засушливых и влажных условий, например, в июне 2002 г. (рис. 1). В то же время, на рисунках видно, что область сильной засухи по данным ГТК (рис. 1а) существенно больше, чем по данным SPI (рис. 1б). В этот период по данным ГТК на территории Волгоградской и Астраханской областей, а также на юге Саратовской области наблюдалась сильная засуха, а по данным индекса SPI засуха такой интенсивности не отмечалась.

Рассмотрим еще пример. Согласно графикам на рис. 2, за 77 лет на территории Самарской области наблюдалось 24 сильные засухи по данным ГТК и 7 сильных засух по данным SPI. Очевидно, что показатели по-разному характеризуют засухи.

Как видно из рис. 3а, ГТК по сравнению с другими показателями существенно завышает частоту сильных засух практически на всей территории исследования: от 20-х засух/100 лет на северо-западе территории до 80-ти засух/100 лет на юго-востоке (т.е. результаты приблизительно в 3–5 раз больше, чем по другим показателям). Наибольшее соответствие пространственного распределения значений повторяемости сильных засух выявлено для данных SPI и SPEI (рис. 3в и 3г). Оно обусловлено, прежде всего, тем, что распределение обоих показателей соответствует нормальному распределению.

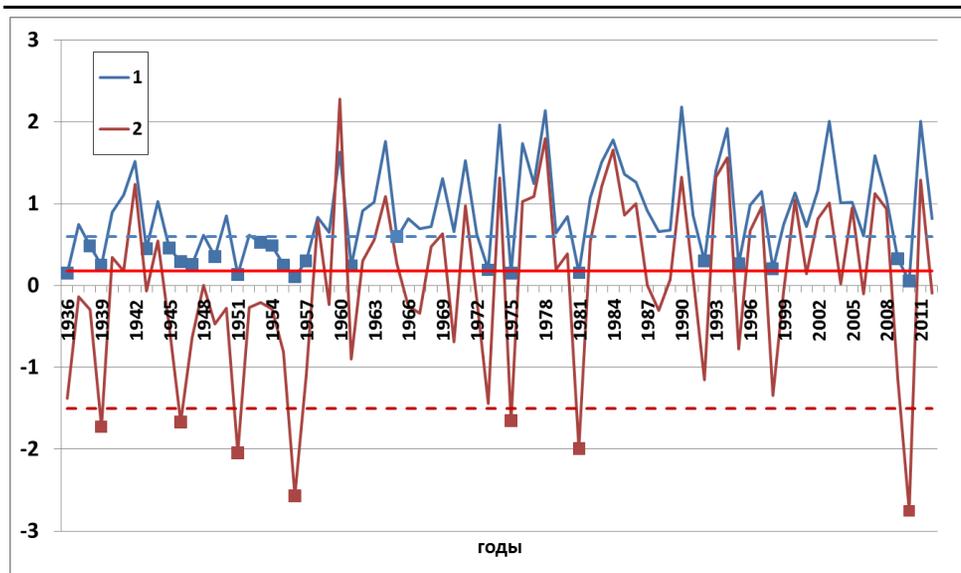


Рисунок 2. Динамика ГТК (1), SPI (2) по Самарской области в июне за период 1936 – 2012 гг. Граничные значения для идентификации сильной засухи: по данным индекса SPI (бордовая прерывистая линия), по данным ГТК по существующей методике (синяя прерывистая линия) и по предлагаемой методике (красная сплошная линия).

Ограничимся сравнением показателей ГТК и SPI, как наиболее тесно связанных. Исходя из свойств нормального распределения, которое соответствует индексу SPI, на засухи (как на отрицательные экстремумы увлажнения) приходится 15.9 % случаев (вне зависимости от местоположения их наблюдения). Такой вероятности наступления засух соответствует значения SPI меньше или равные -1. ВМО относит значения SPI в диапазоне от -1 до 0 к условиям «близким к нормальным», значения ниже -1 означают экстремальные условия – засуху. В отличие от SPI в рекомендованных градациях засух по показателю ГТК не учитывается климатическая норма в каждой точке. Таким образом, ГТК и SPI по своей сути не могут одинаково определять засуху. Исходя из вышесказанного, невозможно решить проблему, просто переопределив эмпирическим путем для каждого показателя градации, количественно характеризующие интенсивность засухи (тем более что для индекса SPI градации утверждены на международном уровне).

Несоответствие в индикации засух при помощи ГТК и SPI происходит из-за различий в форме функций распределения в области меньше -1 для SPI и в окрестности 0 для ГТК (в области малых вероятностей). На рис. 4а схематично показаны функции распределения SPI (сплошная линия) и ГТК в области квантиля 0.159, то есть в области значений SPI, которая относится к засухам по определению (Edwards, McKee, 1997). Для получения индекса SPI функция распределения осадков искусственно приведена к форме квази-нормального распределения, поскольку принято допущение о ее ограниченности слева и справа. В точке -1 распределение SPI пересекает квантиль 0.159. На этой сглаженной кривой можно выбирать различные значения для отсеечения явлений засух разной интенсивности.

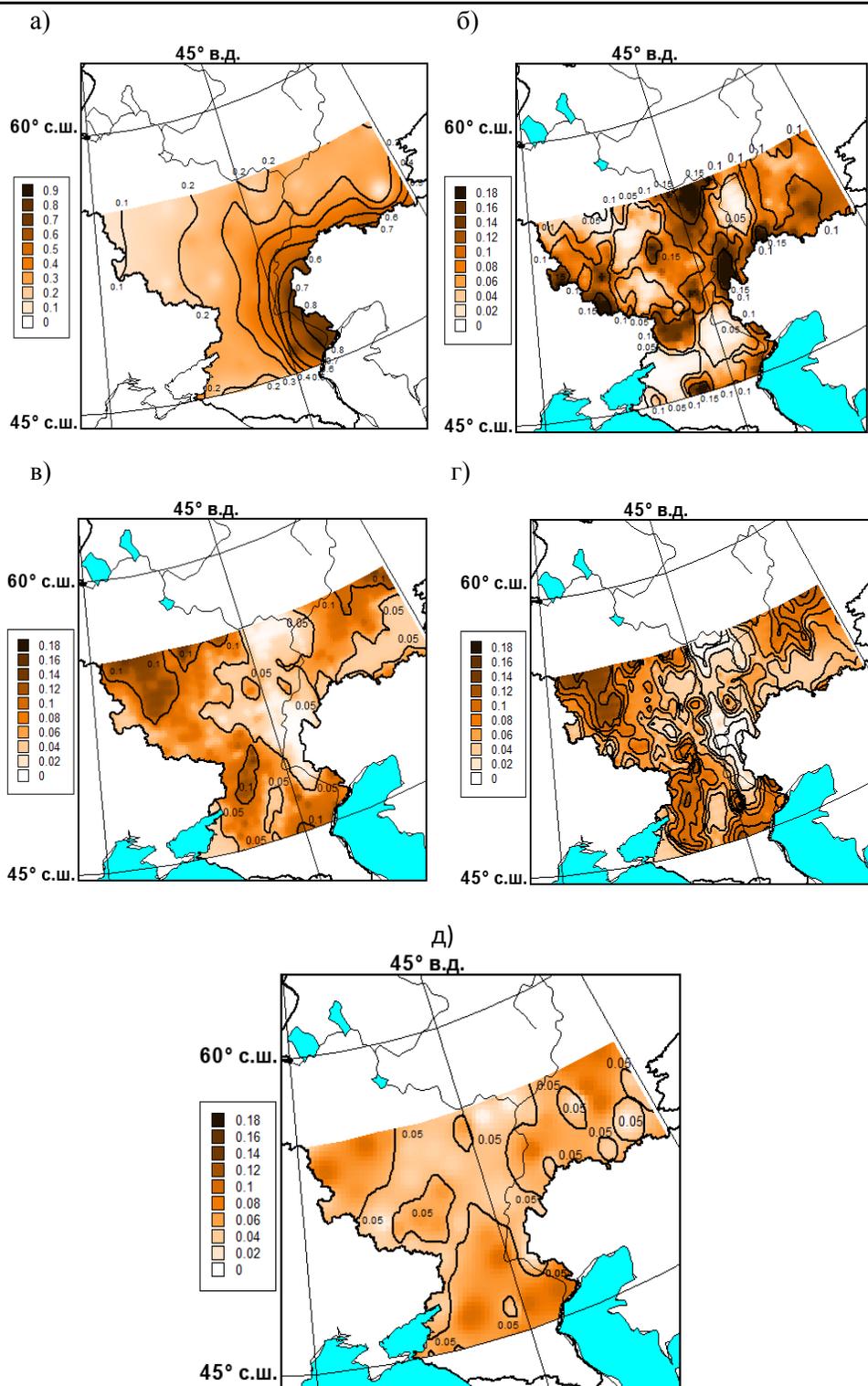


Рисунок 3. Повторяемость сильной засухи на территории исследования по данным ГТК (а), PDSI (б), SPI (в) и SPEI (г) и ГТК по скорректированным градациям интенсивности (д) в июне в период 1961 – 1990 гг.

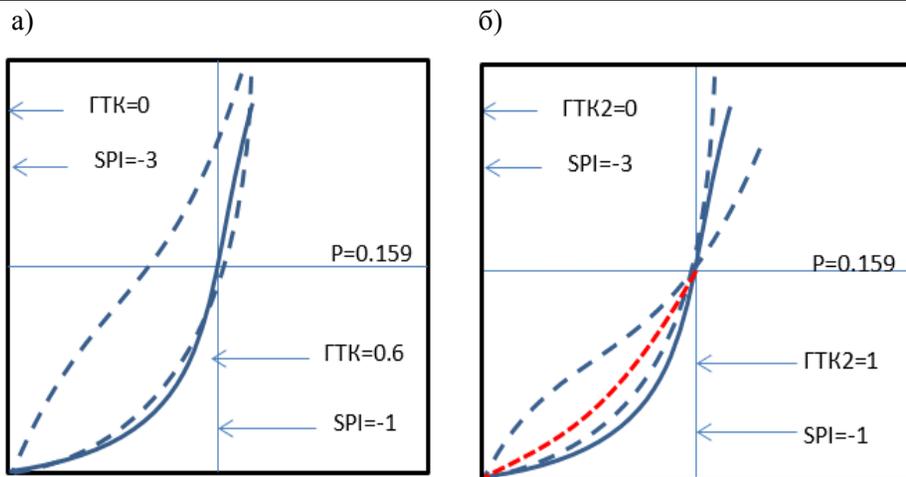


Рисунок 4. Схема процедуры приведения ГТК к единой форме с SPI: первоначальный вид функции распределения ГТК (а) и ее вид ГТК2 после применения процедуры (б).

Анализ значений ГТК, рассчитанного по данным нескольких метеостанций ЕЧР, показал, что эмпирическое распределение показателя достаточно хорошо описывается теоретическим распределением, принадлежащим классу гамма-распределений. При этом функция распределения изначально ограничена нулевым значением слева, и никакой нормализующей процедуре не подвергнута. Например, функция распределения значений ГТК для метеостанции Астрахань имеет параметр формы равный 1.5 и параметр масштаба равный 4.6; для метеостанции Воронеж – соответственно 2.3 и 2.06. Примеры функций распределения для некоторых метеостанций приведены на рис. 5а. Параметры гамма-распределения для разных метеостанций могут существенно отличаться, и на рис. 4а это схематично показано двумя пунктирными линиями – обе кривые являются функциями распределения ГТК, но для разных метеостанций. Различная форма распределения для разных территорий не дает возможности адекватного сравнения характеристик засух между собой.

В работе (Эколого-географические ..., 2011) описана методика преобразования теоретических функций вероятности комплексных климатических показателей (в том числе, ГТК), позволяющих преобразовать их к квазинормальной функции распределения. Поскольку нашей задачей является разработка доступной для широкого круга пользователей методики для улучшения сравнимости результатов при выявлении засух по данным ГТК и данным стандартизованного индекса осадков SPI, мы не будем пользоваться формулами преобразования на всей области определения функции распределения. Данное исследование сфокусировано на анализе левого «хвоста» распределения, поэтому можно ограничиться только значениями, которые находятся слева от квантиля 0.159, приведя тем самым интервал значений ГТК, идентифицирующий засухи, в соответствие с их определением по SPI. Для определения интенсивности засух, можно предложить двухшаговую процедуру.

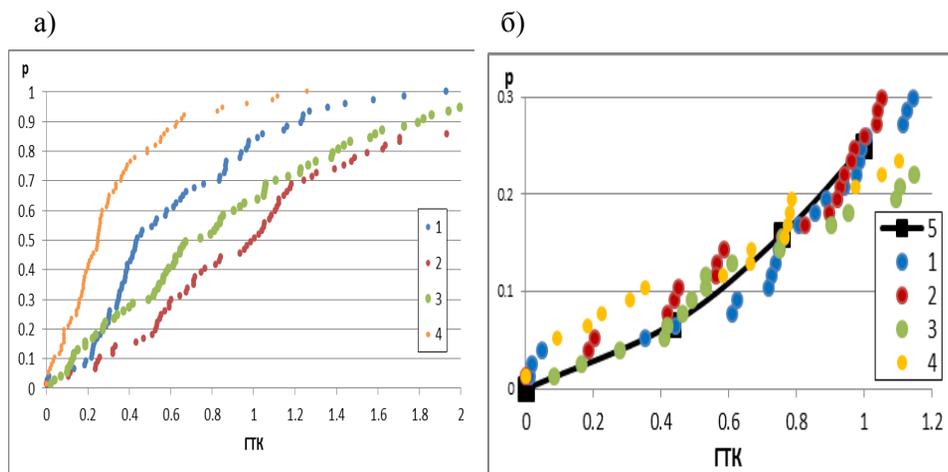


Рисунок 5. Функция распределения ГТК в июне для метеостанций Оренбург (1), Воронеж (2), Самара (3), Астрахань (4) до (а) и после (б) трансформации. Аппроксимирующая парабола (5) показана для метеостанции Оренбург.

Сначала приведем функции распределения в каждой точке к единому виду в окрестностях вероятности 0.15. Для этого умножим все значения ГТК на величину, обратную значению квантиля 0.159. Тогда графики на рис. 4а трансформируются и примут вид, приведенный на рис. 4б. Далее аппроксимируем левый участок распределения параболой, проходящей через точки $(0, 0)$, $(K, 0.069)$ и $(1, 0.159)$, где K – значение для квантиля 0.069. Аппроксимирующая парабола показана на рис. 4б красной пунктирной линией.

Предлагаемая методика существенно проще процедуры, применяемой для вычисления SPI. Необходимо отметить, что методика ориентирована только на засухи как на один из наиболее востребованных для мониторинга климатических экстремумов. На рис. 5б приведен пример трансформированных функций распределения для 4-х метеостанций и аппроксимирующая парабола (для метеостанции Оренбург).

Характеристики сглаживающей кривой выбраны таким образом, что в пределе доля засух и сильных засух, вычисленная по этому показателю, будет совпадать с результатами анализа, полученным с помощью SPI. Следовательно, пространственное распределение частоты засух и статистика их повторяемости по данным ГТК после применения предложенной методики (рис. 3д) будут в большей степени согласованы с аналогичными характеристиками для индекса SPI (рис. 3в), чем в первоначальном варианте (рис. 3а). Пространственное распределение градации интенсивности сильной засухи, рассчитанное для каждой метеостанции на ЕЧР на основе применения предлагаемого подхода в мае (а), июне (б) и июле (в) в период 1936 – 2012 гг. приведено на рис. 6. Как видно из рис. 6а - 6в значения градаций соответствуют зональности увлажнения территории (уменьшаются в сухих зонах) и градации повышаются к середине вегетационного сезона.

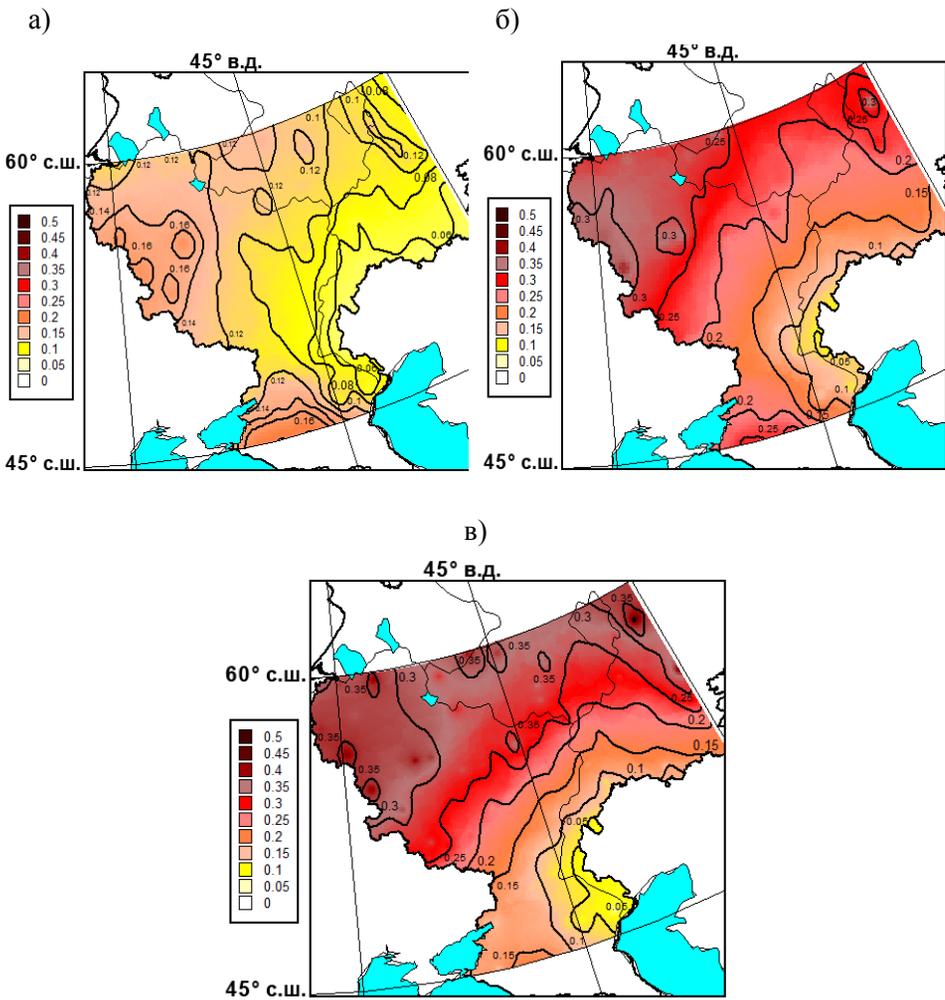


Рисунок 6. Пространственное распределение граничных значений ГТК для определения интенсивности сильных засух в мае (а), июне (б) и июле (в) в период 1936 – 2012 гг. согласно предлагаемой новой методике.

Таким образом, для определения градаций интенсивности засухи по данным ГТК предлагается использовать рассчитанные для каждой метеостанции интервалы значений. Вычисление выполняется таким образом, что данные по разным станциям становятся сравнимы между собой и сопоставимы со статистикой засух по данным индекса SPI.

Заключение

В статье проведен обзор современных наиболее широко используемых отечественных и зарубежных показателей засушливости: ГТК, PDSI, SPI и SPEI. Установлено, что наиболее тесная корреляционная зависимость ГТК в исследуемом регионе в мае-июле в период 1936 – 2012 гг. наблюдалась с вре-

менными рядами SPI и SPEI. Однако высокие коэффициенты корреляции между временными рядами показателей, отражающих и засушливость, и избыток увлажнения, не гарантируют одинаковую интерпретацию засух.

Существующая методика определения интенсивности засухи по ГТК позволяет сравнивать соотношение тепла и влаги в различных точках исследуемой территории между собой, но при определении засухи ее градации меняются в зависимости от зональности увлажнения и месяцев вегетационного сезона. При таком подходе статистика засух по ГТК и по данным других широко используемых за рубежом количественных показателей засух демонстрирует отличающиеся результаты. ГТК по сравнению с другими показателями существенно завышает повторяемость засух в период активной вегетации практически на всей территории исследования.

Предложена новая методика для улучшения сравнимости результатов при выявлении засух по данным ГТК и данным стандартизованного индекса осадков SPI. Для определения интенсивности засухи по данным ГТК предлагается использовать градации для каждой метеостанции. Они вычислены таким образом, что характеристики засух по разным станциям становятся сравнимыми между собой и сопоставимы со статистикой засух по данным индекса SPI.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке РНФ (проект № 14-17-00645 «Реконструкция и прогноз частоты засух в центре Восточно-Европейской равнины по данным дендрохронологии и климатического моделирования»).

Список литературы

Алпатьев А.М., Иванова В.Н. 1958. Характеристика и географическое распространение засухи. – В кн.: Засухи в СССР, их происхождение, повторяемость и влияние на урожай. – Л., Гидрометеиздат, с. 31 – 46.

Бучинский И.Е. 1976. Засухи и суховеи. – Л., Гидрометеиздат, 214 с.

Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В., Черенкова Е.А. 2007. Динамика засух в Европейской России в ситуации глобального потепления. – Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – СПб., Гидрометеиздат, т. 21, с. 160 – 181.

Процеров А.В. 1950. Засуха на европейской территории Союза ССР. – В сб.: Агроклиматические условия степи Украинской ССР и пути их улучшения. – Киев, Изд. АН УССР, с. 17 – 23.

Руденко А.И. 1958. Типы засух вегетационного периода и их характеристика. – В кн.: Засухи в СССР, их происхождение, повторяемость и влияние на урожай. – Л., Гидрометеиздат, с. 46 – 53.

Селянинов Г. Т. 1928. О сельскохозяйственной оценке климата. – Труды по сельскохозяйственной метеорологии, вып. 20, с. 165 – 177.

Селянинов Г.Т. 1958. Происхождение и динамика засух. – В кн.: Засухи в СССР, их происхождение, повторяемость и влияние на урожай. – Л., Гидрометеоиздат, с. 5 – 30.

Страшная А.И., Тищенко В.А., Береза О.В., Богомолова Н.А. 2015. О возможности использования стандартизированного индекса осадков для выявления засух и в прогнозах количественной оценки урожайности зерновых и зернобобовых культур. – Труды Гидрометцентра России, вып. 357, с. 81 – 97.

Уланова Е.С. 1988. Засухи в СССР и их влияние на производство зерна. – Метеорология и гидрология, № 7, с. 127 – 134.

Черенкова Е.А. 2013. Количественные оценки атмосферных засух в Европейской России. – Известия РАН, сер. геогр, № 6, с. 76 – 85.

Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири. 2011. /Под ред. Н.С. Касимова, А.В. Кислова/. – М.: МАКС Пресс, 496 с.

Beguera S, Vicente-Serrano S.M., Reig F., Latorre B. 2014. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *Int. J. Climatol.*, 34, p. 3001 – 3023.

Edwards D.C., McKee T.B. 1997. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report No. 97 - 2.* – Colorado State University, Fort Collins Colorado, 155 pp.

Guttman N.B. 1998. Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), p. 113 – 121.

Guttman N.B. 1999. Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), p. 311 – 322.

Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Climatol.*, vol. 34, issue 3, p. 623 – 642.

IPCC 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Madsen H., Mikkelsen P.S., Rosbjerg D., Harremoes P. 1998. Estimation of regional intensity-duration frequency curves for extreme precipitation. *Water Science and Technology*, 37(11), p. 29 – 36.

McKee T.B., Doesken N.J., Kliest J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology.* – Anaheim, USA, p. 179 – 184.

Panofsky H. A., Brier G. W. 1958. Some Applications of Statistics to Meteorology. Earth and Mineral Sciences Continuing Education. College of Earth and Mineral Sciences. – The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, 224 pp.

Penman H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. London, A193, p.120-146.

Thorn H.C.S. 1966. Some Methods of Climatological Analysis. WMO Technical Note Number 81. – Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 53 pp.

Van der Schrier G., Briffa K.R., Jones P.D., Osborn T.J. 2006. Summer moisture variability across Europe. Journal of Climate, vol.19, p. 2818 – 2834.

WMO 2009. Experts agree on a universal drought index to cope with climate risk Press Release. No. 872. http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_872_en.html.

Статья поступила в редакцию: 31.03.2016.

После переработки: 22.09.2016.