

**О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
СТАНДАРТИЗИРОВАННОГО ИНДЕКСА
ОСАДКОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЗАСУХ
И В ПРОГНОЗАХ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ
УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ И ЗЕРНОБОБОВЫХ
КУЛЬТУР**

А.И. Страшная, В.А. Тищенко, О.В. Береза, Н.А. Богомолова

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации
ais@mecom.ru*

В агрометеорологическом обеспечении сельского хозяйства, проводимом Гидрометцентром России, основное внимание уделяется оперативной информации о влиянии складывающихся погодных условий, особенно экстремальных, на состояние и продуктивность сельскохозяйственных культур. При этом большое значение имеют данные мониторинга засух, т.к. именно это опасное природное явление в Российской Федерации, где более 60 % пахотных земель находятся в районах с недостаточным и неустойчивым увлажнением, часто вызывает значительный недобор урожая, а в отдельные годы – гибель сельскохозяйственных культур на больших площадях [1, 2, 12, 14, 15].

Различают обычно три типа засух: атмосферную, почвенную и атмосферно-почвенную засуху, или общую [3, 12, 13]. Известно, что большинство районов России наиболее часто подвергается негативному воздействию атмосферных засух. Сведения о распространении и частоте сильных и обширных атмосферных засух, которые охватывали не менее трех крупных регионов, можно найти в [10, 14]. Почвенные засухи, как правило, являются следствием атмосферных засух, т.е. длительного отсутствия осадков

или их незначительного количества [8, 12]. Для оперативного мониторинга атмосферных засух наряду с количеством осадков в % нормы [6, 13] нами используется наиболее распространенный в агрометеорологии гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова (ГТК), представляющий собой отношение суммы осадков к сумме активных температур воздуха, уменьшенной в десять раз, которая характеризует испаряемость. Целесообразность использования ГТК обусловлена не только удобством применения в автоматизированных расчетах на основе регулярно поступающих декадных агрометтеграмм и возможностью классифицировать засухи по интенсивности (сильная, средняя и слабая), но и достаточно тесной связью с урожайностью основных сельскохозяйственных культур во многих районах, что позволяет использовать его в прогностических целях [4, 7, 9, 14].

В 2009 г. Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО) рекомендовала использовать для мониторинга засух стандартизированный индекс осадков (The Standardized Precipitation Index – SPI), который в исследовательском или в оперативном режиме используется более чем в 70 странах [16]. Наша многолетняя оперативная практика обеспечения сельскохозяйственной отрасли России показала, что именно способность того или иного показателя оценить отклик растений (посевов сельскохозяйственных культур) на сложившиеся засушливые условия является основным критерием для применения его в оперативной агрометеорологии, а также агрономической практике. Агрометеорологических исследований по установлению возможности использования рекомендуемого (SPI) индекса в Российской Федерации проводилось мало. При этом лишь в последние годы появились отдельные работы по изучению возможности использования его с целью выявления районов распределения засух, засушливых условий, а также увлажненности территорий [4, 11].

В связи с этим в 2014 г. в рамках НИР 1.1.7.1 была поставлена задача выявить сходимость результатов идентификации засух по ГТК и SPI, а также определить связь SPI с урожайностью сельскохозяйственных культур и возможность использования в физико-статистических агрометеорологических моделях урожайности.

С этой целью по данным гидрометстанций на территории Центрального и Приволжского федеральных округов были созданы алгоритмы расчетов SPI, для чего использовалась предварительно созданная в отделе долгосрочных прогнозов погоды Гидрометцентра России специализированная база осадков по гидрометстанциям этих округов за 1966–2013 гг.

Индекс SPI основан на распределении вероятности осадков в любом временном масштабе. По существу, он базируется на использовании временных рядов месячных сумм осадков; фактически это преобразованная величина количества осадков, имеющая нормальное распределение. Расчеты SPI могут производиться за любой период – месяц, сезон, год, т. е. и в зимний период, тогда как ГТК – только в вегетационный период. Кроме того, преимущество SPI – стандартизация, которая гарантирует то, что частоты чрезвычайных событий в любом месте и в любом масштабе времени согласованы.

При расчетах SPI [17, 18] временные ряды месячных сумм осадков преобразовывались с помощью статистических распределений. Первое – это гамма распределение, когда по данным о количестве осадков для конкретной территории строится функция плотности гамма-распределения, при этом функция плотности вероятности которого определяется как

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

где $\alpha > 0$ – параметр формы; $\beta > 0$ – параметр масштаба; $x > 0$ – количество осадков; Γ – гамма-функция, которая определена как

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy. \quad (2)$$

Параметры α и β оцениваются с помощью уравнений:

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

Для n наблюдений
$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(\bar{x})}{n}.$$

Интегрирование функции плотности вероятности относительно x и оценок α и β приводит к выражению для функции распределения $G(x)$ наблюдаемых значений количества осадков, для данного временного масштаба:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx. \quad (3)$$

Так как гамма-распределение не определено для $x = 0$ и $q = P(x = 0) > 0$, где $P(x = 0)$ – вероятность нулевых осадков, кумулятивная вероятность преобразуется:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x). \quad (4)$$

Совокупное распределение вероятности далее преобразуется в стандартное нормальное распределение, чтобы привести суммы осадков к SPI. Этот процесс проиллюстрирован на рис. 1.

В табл. 1 приведены значения SPI, соответствующие различным состояниям увлажненности (засушливости). Важно, что значения SPI не зависят от периода накопления суммы осадков и географических координат.

Для количества осадков, например $x = 101$, получаем $SPI = 1,1$.

Нами были рассчитаны месячные значения SPI (апрель – август) по метеорологическим станциям, расположенным в Центральном и Приволжском федеральных округах за 1966–2013 гг. Для некоторых станций отсутствующие значения месячных сумм осадков, которые необходимы для расчета SPI, вычислялись с помощью кубической интерполяции. При этом также получены сезонные значения (поля) осадков и SPI.

Используя расчетные значения SPI, были построены карты распределения этого показателя по метеорологическим станциям в Центральном и Приволжском федеральных округах за отдельные годы по месяцам основного весенне-летнего периода вегетации зерновых культур (апрель – июль). Их анализ показал значительное сходство с агрометеорологической оценкой условий увлажнения этих территорий по ГТК.

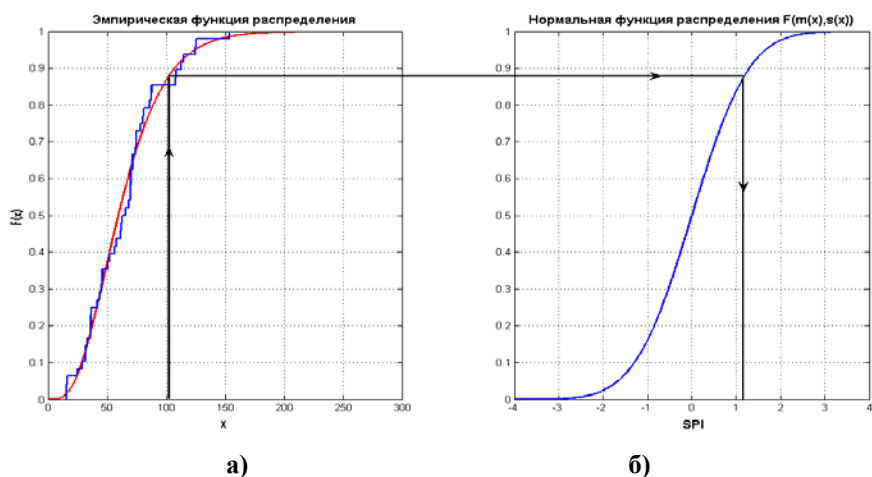


Рис. 1. Преобразование количества осадков в SPI: эмпирическая функция распределения и соответствующее гамма-распределение (а); функция нормального распределения с эмпирическими средним и среднеквадратическим отклонением (б).

Таблица 1

Классификация засушливости по значениям SPI и соответствующие вероятности

Значение SPI	Категория	Вероятность, %
2,00 и более	Экстремальное увлажнение	2,3
от 1,50 до 1,99	Сильное увлажнение	4,4
от 1,00 до 1,49	Умеренное увлажнение	9,2
от 0,0 до 0,99	Мягкое увлажнение	34,1
от 0,0 до -0,99	Слабая засушливость	34,1
от -1,00 до -1,49	Умеренная засушливость	9,2
от -1,50 до -1,99	Серьезная засуха	4,4
-2,00 и менее	Экстремальная засуха	2,3

При построении таких карт для удобства агрометеорологической интерпретации сложившихся условий увлажнения и с учетом того, что существенное снижение урожайности наблюдается при

сильных засухах, нами для характеристики интенсивности засух были использованы менее дробные градации SPI (табл. 2).

Таблица 2

Показатели интенсивности засух

Показатели интенсивности засух	SPI	ГТК
Очень сильная (экстремальная) засуха	-2,0...-3,0	$\leq 0,30$
Сильная засуха	-1,0...-1,99	0,31-0,60
Слабая засуха	-0,10...0,99	0,61-0,80
Умеренное или достаточное увлажнение	0,0...1,0	более 0,80

Для примера на рис. 2 представлено распределение SPI за июнь 2013 г. по метеорологическим станциям Центрального и Приволжского федеральных округов.

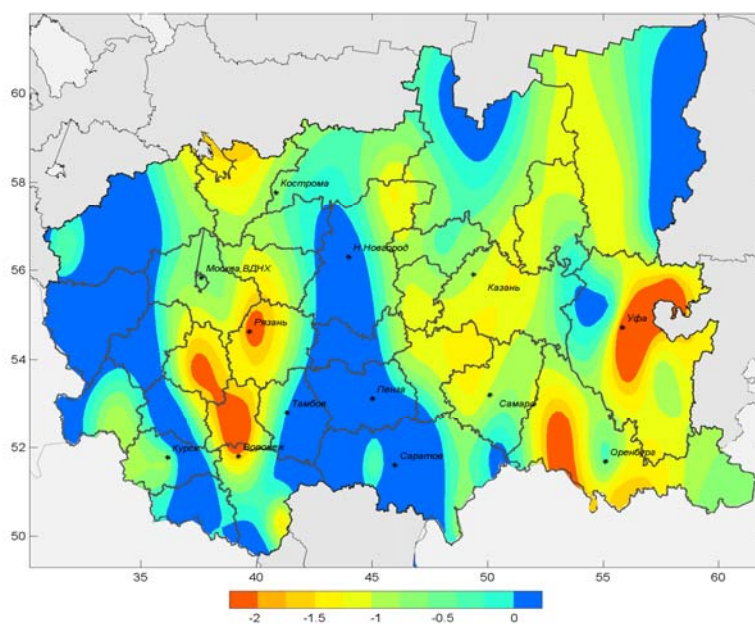


Рис. 2. Распределение SPI в июне 2013 г. по территории Центрального и Приволжского федеральных округов.

Можно видеть, что засушливые условия в июне 2013 г. в Центральном федеральном округе наблюдались на небольших территориях: в центральных и южных районах Липецкой, Тульской областей, а также в центральных и северо-западных районах Рязанской области. В Приволжском федеральном округе засушливые условия наблюдались в западной половине и ряде южных районов Оренбургской области, северо-восточных районах Республики Башкортостан, а также в ряде районов Самарской, Ульяновской областей и Республики Татарстан. При этом по отдельным метеорологическим станциям засуха была сильной и очень сильной или экстремальной (SPI от $-1,0$ до $-2,0$). Такая ситуация подтверждается фактическими данными о значительном дефиците осадков: на этой территории их выпало в основном от 40 до 52 % нормы, в Тульской и Рязанской областях – 63–64 % нормы, а ГТК составлял от 0,26 до 0,60.

Для решения задач по определению адекватности SPI, ГТК и количества осадков в % нормы по месячным значениям при характеристике увлажненности территорий указанных округов, выявления засух и для сравнения результатов идентификации засух по этим показателям, нами строились карты распределения их расчетных значений за основной период вегетации зерновых культур (май, июнь, июль) по субъектам Приволжского федерального округа.

Анализ показал, что на преобладающей территории округа отмечается вполне удовлетворительное сходство распределения SPI с распределением ГТК, а также с осадками в % нормы, т. е. наблюдалась адекватность выявления засух и увлажненности по этим показателям. Это указывает на возможность использования SPI наравне с ГТК.

В качестве примера распределение SPI, количества осадков в % нормы и ГТК в июне 2013 года по Оренбургской области показано на рис. 3.

Как видно на рисунке, районы засух по SPI и ГТК в основном идентичны. Однако следует отметить, что по значению ГТК засуха характеризовалась как очень сильная на большей части территории области, зона сильной засухи наблюдалась на востоке области и на

небольшой территории на северо-западе. По значениям SPI зона очень сильной (экстремальной) засухи занимала меньшую площадь (западная половина области и южные районы), переходя в градацию сильной засухи. Более жесткое выделение очень сильной засухи по ГТК можно объяснить, по-видимому, тем, что этот показатель учитывает и температуру воздуха, которая в июне превышала норму на 2–3 °С. В целом идентично выделялась засуха и по количеству осадков в % нормы.

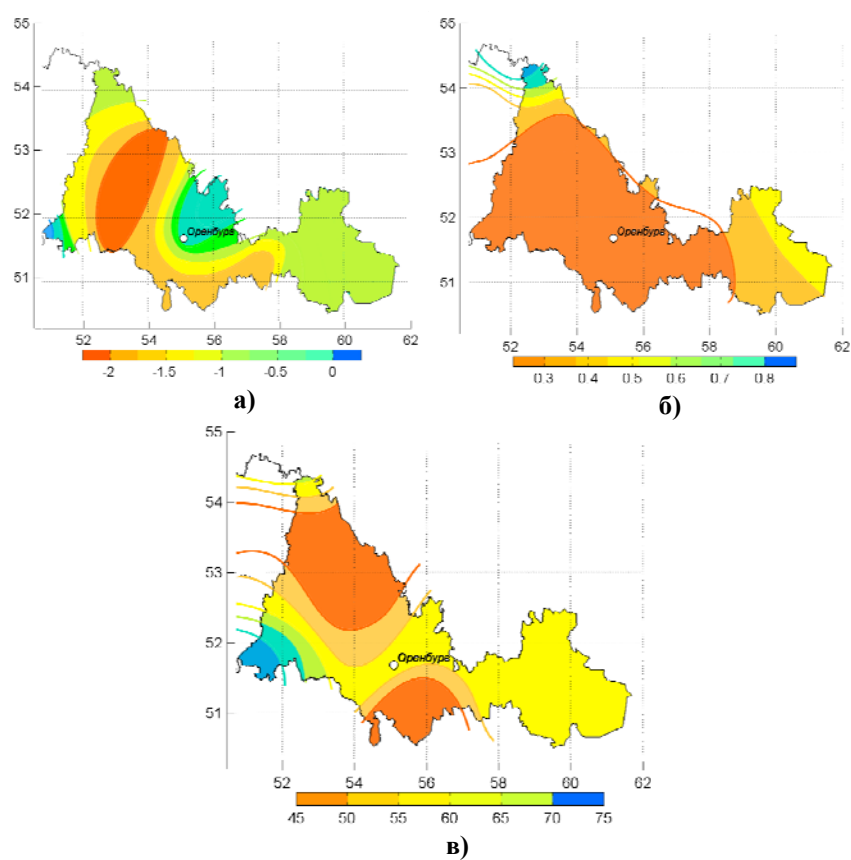


Рис. 3. Распределение SPI (а), ГТК (б) и количества осадков в % нормы (в) в июне 2013 года по Оренбургской области.

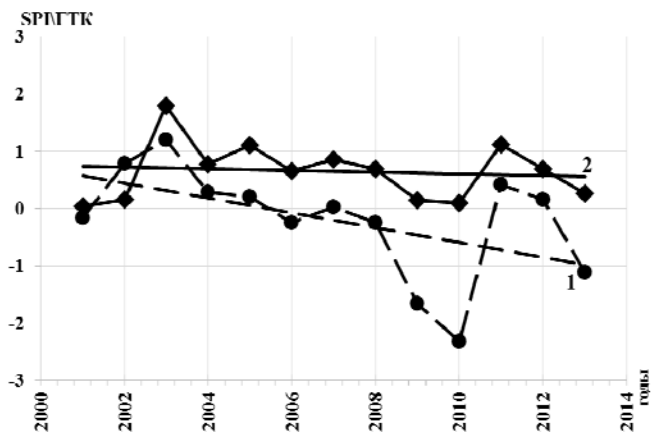
Таким образом, используя SPI в соответствии с приведенной выше классификацией, для каждого конкретного пункта (метеостанции) в субъектах можно определить вероятность возникновения засухи той или иной интенсивности. Начало засушливых условий устанавливается, когда значение SPI становится меньше 0,0 (ниже $-0,10$), окончание их определяется временем, когда этот индекс становится положительным. Внутри периода с отрицательными значениями индекса SPI в соответствии с выбранными градациями устанавливаются периоды засух различной интенсивности.

Нами были рассчитаны средние областные значения SPI и ГТК и анализировалась их динамика по годам за период 2001–2013 гг. по субъектам Приволжского федерального округа. В качестве примера такая динамика представлена на рис. 4 по Самарской и Оренбургской областям.

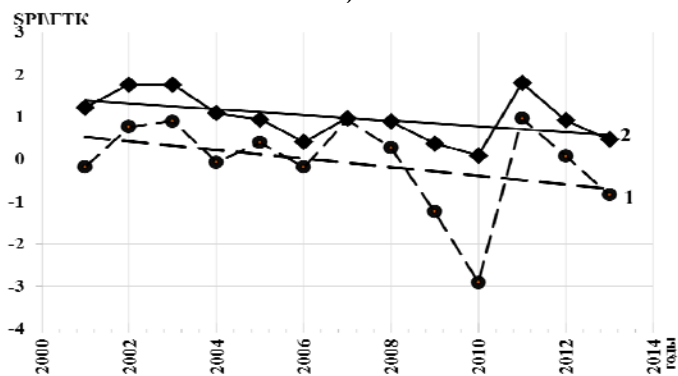
Как можно видеть на рисунке, сходимость этих показателей по годам хорошо выражена. Коэффициент корреляции (r) между ними составляет 0,80–0,90. Анализ трендов как SPI (1), так и ГТК (2) указывает на усиление засушливости в июне в обоих субъектах, но в Самарской области это выражено в большей степени.

При параллельном картировании среднеобластных значений ГТК и SPI оказалось, что в большинстве случаев визуальное отображение засух на рассматриваемой территории достаточно адекватно. На рис. 5 показано распределение этих показателей за июнь 2010 г. по Центральному федеральному округу, когда засухой были охвачены лишь юго-восточные районы Центрального округа, и июль 2010 г., когда она распространилась на большую часть территории округа.

Некоторое расхождение при выделении засушливых районов, по-видимому, можно объяснить тем, что ГТК учитывает не только приход влаги (осадки), но и в определенной степени ее расход за счет испаряемости, выраженной суммами активных температур, входящих в формулу ГТК. При этом в июле расхождения были несколько больше, чем июле в связи с экстремально высокими температурами воздуха (на 5,7–7,0 °C выше нормы).



а)



б)

Рис. 4. Динамика SPI (1) и ГТК (2) по Оренбургской (а) и Самарской (б) областям в июне за период 2001–2013 гг.

Некоторое расхождение при выделении засушливых районов, по-видимому, можно объяснить тем, что ГТК учитывает не только приход влаги (осадки), но и в определенной степени ее расход за счет испаряемости, выраженной суммами активных температур, входящих в формулу ГТК. При этом в июле расхождения были несколько больше, чем июле в связи с экстремально высокими температурами воздуха (на 5,7–7,0 °С выше нормы).

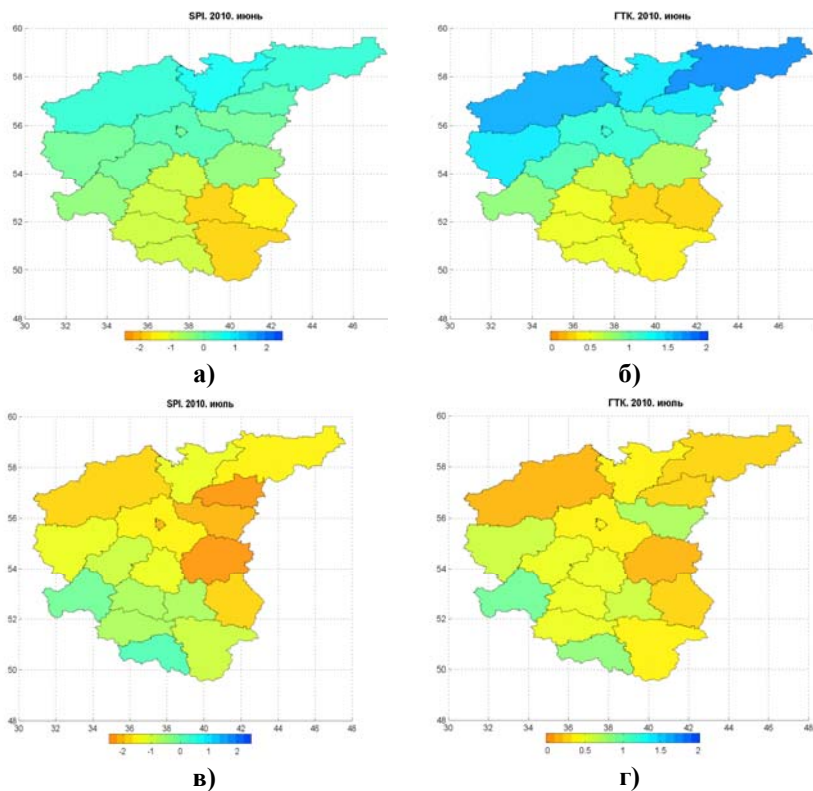


Рис. 5. Распределение среднеобластных значений SPI (а, в) и ГТК (б, г) по субъектам Центрального федерального округа в июне (а, б) и июле (в, г) 2010 г.

Известно, что во многих физико-статистических методах прогнозов урожайности зерновых культур используется ГТК, иногда в сочетании с другими показателями агрометеорологических условий [5, 7, 9, 13].

В этой связи необходимо было выявить возможность использования значений индекса SPI в прогностических схемах для количественной оценки ожидаемой средней по субъекту урожайности зерновых культур.

Для этих целей по территории Приволжского федерального округа была установлена теснота связей и рассчитаны коэффициенты корреляции между урожайностью зерновых и зернобобовых культур и средними по субъектам значениями ГТК и SPI. По субъектам Среднего Поволжья, где засухи наиболее часты, они представлены в табл. 3.

Оказалось, что значения коэффициентов корреляции этих показателей с урожайностью в большинстве случаев близки, а по отдельным субъектам связь урожайности с SPI оказалась несколько теснее (r на 0,05–0,17 выше). Наиболее тесные связи этих показателей с урожайностью зерновых культур наблюдаются в мае и июне, в апреле связь незначима, т.к. на основных площадях яровые зерновые еще не посеяны; сев этих культур начинается в апреле только на юге территории (в Саратовской области $r = 0,31$, что значимо для данного ряда).

Таблица 3

Коэффициенты корреляции (r) между урожайностью зерновых и зернобобовых культур и значениями ГТК и SPI по месяцам вегетационного периода (1966–2013 гг.)

Показатель	Апрель	Май	Июнь	Июль
Самарская область				
ГТК	–	0,41	0,53	0,24
SPI	0	0,45	0,56	0,14
Республика Татарстан				
ГТК	–	0,33	0,55	–0,02
SPI	–0,12	0,41	0,63	0,05
Оренбургская область				
ГТК	–	0,40	0,45	0,28
SPI	–0,03	0,57	0,56	0,32
Саратовская область				
ГТК	–	0,47	0,48	0,52
SPI	0,31	0,5	0,56	0,44
Ульяновская область				
ГТК	–	0,32	0,54	0,22
SPI	0,19	0,28	0,60	0,11

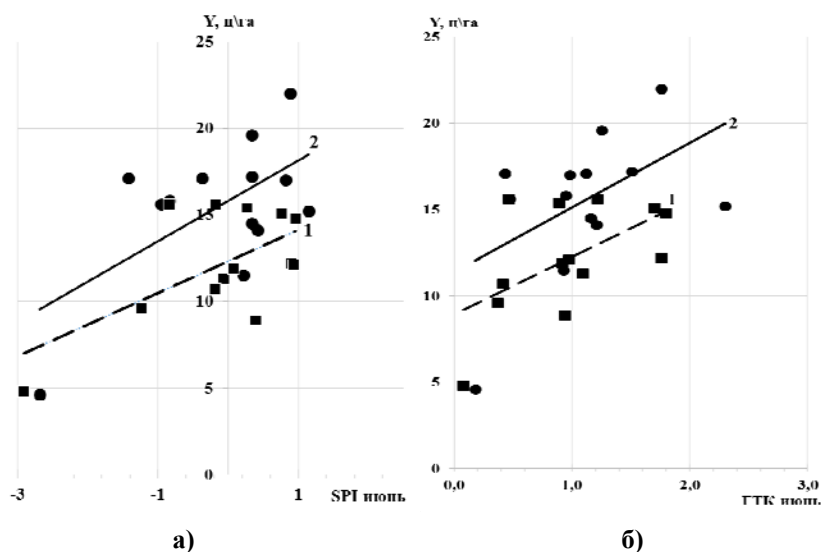


Рис. 6. Зависимость урожайности зерновых культур (Y, ц/га) от значений SPI (а) и ГТК (б) по Самарской (1) и Ульяновской (2) областям.

Наглядно связь урожайности зерновых культур с SPI и ГТК показано на рис. 6 по Ульяновской и Самарской областям. Можно видеть, что высокая (выше средней) урожайность получена в основном в годы, когда значение SPI были положительными или близкими к нулю, а значения ГТК были 0,95 и более, т.е. при умеренном и достаточном увлажнении.

Установленная теснота связей урожайности зерновых культур со значениями SPI и ГТК позволила нам разработать регрессионные уравнения зависимости урожайности зерновых культур от этих показателей в мае и июне.

В табл. 4 ниже представлены значения коэффициентов регрессии полученных уравнений:

- a_1 – коэффициент при ГТК в мае;
- a_2 – коэффициент при ГТК в июне;
- a_1' – коэффициент при SPI в мае;

a_2' – коэффициент при SPI в июне;

C, C' – свободные члены уравнений;

R, R' – множественные коэффициенты корреляции

Таблица 4

Значения коэффициентов регрессии уравнений

Субъекты РФ	a_1	a_2	C	R	a_1'	a_2'	C'	R'
Самарская область	2,399	3,498	7,439	0,63	1,599	1,947	12,357	0,65
Саратовская область	3,715	3,232	6,017	0,64	1,803	1,668	11,278	0,66
Оренбургская область	2,282	2,946	5,370	0,57	1,598	1,682	9,071	0,66
Республика Татарстан	3,868	7,536	9,459	0,63	2,524	4,844	21,389	0,67
Ульяновская область	1,106	3,180	10,508	0,57	1,102	2,409	15,092	0,64

С целью совершенствования полученных уравнений, в них в качестве дополнительного предиктора был введен важный для формирования урожая зерновых культур средний за июнь дефицит влажности воздуха. При этом множественные коэффициенты корреляции повышались до 0,81–0,90. Например, по Республике Татарстан полученное уравнение имеет вид:

$$Y = 3,124SPI_5 + 4,879SPI_6 - 0,285D_6 + 27,419; R = 0,90 . \quad (5)$$

Была проведена проверка уравнений на зависимых материалах за период 2001–2013 гг. Она показала возможность использования SPI для прогнозирования количественной оценки урожайности зерновых и зернобобовых культур в указанных субъектах. С учетом большой заблаговременности прогноза (за 1–1,5 месяца до начала массовой уборки и за 2,5–3 месяца до ее окончания) оправдываемость прогнозов оказалась вполне приемлемой – 73–80 %.

Оправдываемость прогнозов на основе ГТК была почти такой же или на 2–3 % ниже. При введении дефицита влажности воздуха в уравнения, построенные на основе SPI, оправдываемость прогнозов повышалась до 79–89 %.

Выводы

Нами впервые была выявлена приемлемая адекватность идентификации засух и увлаженности территорий по SPI в сравнении с ГТК по Центральному и Приволжскому федеральным округам. Некоторое расхождение в отображении засухи отмечено при высоких положительных аномалиях воздуха.

На примере субъектов Среднего Поволжья показано, что индекс SPI, как и ГТК, достаточно тесно связан с урожайностью зерновых и зернобобовых культур, при этом частные коэффициенты корреляции урожайности с ГТК и SPI весьма близки по значениям.

Показана возможность прогнозирования величины урожайности по уравнениям с использованием SPI в мае и июне по субъектам Среднего Поволжья, а также уравнений на основе SPI в мае, июне и дефицита влажности воздуха в июне. Оправдываемость предложенного метода, рассчитанная на зависимых материалах за 2001–2013 гг., оказалась удовлетворительной. Относительная ошибка при использовании уравнений на основе SPI колебалась от 4 до 19 %, при использовании уравнений на основе SPI и дефицита влажности воздуха относительная ошибка уменьшалась на 3–6 %.

Список использованных источников

1. Вильфанд Р.М., Страшная А.И. Климат, прогнозы погоды и агрометеорологическое обеспечение сельского хозяйства в условиях изменения климата // Адаптация сельского хозяйства России к меняющимся погодно-климатическим условиям: сборник докладов международной научно-практической конференции 7–11 декабря 2010 г. – М.: Из-во РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2011. – С. 23–38.

2. Гордеев А.В., Бутковский В.А. Россия – зерновая держава. – М.: ДеЛи принт, 2009. – 470 с.

3. Грингоф И.Г., Клеценко А.Д. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том 1. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2011. – 808 с.

4. *Клещенко А.Д., Савицкая О.В.* Оценка пространственно-временного распределения урожайности зерновых культур и стандартизованного индекса осадков по спутниковой и наземной информации // Труды ГГО. – 2014. – Вып. 571. – С. 147–161.
5. *Лебедева В.М., Страшная А.И.* Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том II. Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Книга 2. Оперативное агрометеорологическое прогнозирование. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. – 216 с.
6. *Мещерская А.В., Лугина К.М., Леднева К.В.* К сравнению осадков, осредненных по площади, с осадками отдельных станций // Труды ГГО. – 1978. – Вып. 400. – С. 28–39.
7. *Страшная А.И.* Использование показателей увлажнения для оценки засушливости и прогноза урожайности зерновых культур в Поволжском экономическом районе // Труды Гидрометцентра России. – 1993. – Вып. 327. – С. 15–22.
8. *Страшная А.И., Богомолова Н.А.* О каталоге почвенных засух под ранними яровыми зерновыми культурами в Черноземной зоне России // Труды Гидрометцентра России. – 2005. – Вып. 340. – С. 35–47.
9. *Страшная А.И., Коренкова Н.В.* О засушливости в Среднем Поволжье и ее влиянии на урожайность яровой пшеницы // Труды Гидрометцентра России. – 2005. – Вып. 340. – С. 25–34.
10. *Страшная А.И., Максименкова Т.А., Чуб О.В.* Агрометеорологические особенности засухи 2010 года в России по сравнению с засухами прошлых лет // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 345. – С. 194–214.
11. *Уткузова Д.Н., Хан В.М., Вильфанд Р.М.* Статистический анализ эпизодов экстремальной засушливости и увлажненности на территории РФ // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Том 28, № 1 (312). – С. 66–75.
12. *Чуб О.В., Страшная А.И.* О возможности использования нового агрометеорологического коэффициента увлажнения для мониторинга атмосферно-почвенных засух // Труды Гидрометцентра России. – 2012. – Вып. 347. – С. 190–206.
13. *Уланова Е.С.* Методы оценки агрометеорологических условий и прогнозов урожайности зерновых культур. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 54 с.
14. *Уланова Е.С., Страшная А.И.* Засухи в России и их влияние на урожайность зерновых культур // Труды ВНИИСХМ. – 2000. – Вып. 33. – С. 64–83.
15. *Фролов А.В., Страшная А.И.* О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур // Анализ условий аномальной погоды на

территории России летом 2010 года: сборник докладов. – М.: Триада, лтд, 2011. – 72 с.

16. Standardized Precipitation Index. User Guide // WMO-No. 1090. – 2012. – 18 p.

17. *Lloyd-Hughes B., Saunders M.A.* A drought climatology for Europe // Int. J. Climatol. – 2002. – Vol. 22. – P. 1571–1592.

18. *Guttman Nathaniel B.* Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm // Journal of the american water resources association. – April 1999. – Vol. 35, No. 2.

Поступила в редакцию 19.08.2015 г.