

УДК 551.811+633.854.78

Агрометеорологические условия и прогнозирование урожайности семян подсолнечника в Центральном федеральном округе

А.И. Страшная, О.В. Береза, П.С. Кланг

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
ais@mecom.ru*

Исследована динамика урожайности подсолнечника и ее изменчивость по субъектам Центрального федерального округа за период с 1996 по 2017 г. Анализируются темпы повышения урожайности за счет культуры земледелия и колебания урожайности вследствие погодных условий. Разработаны новые физико-статистические модели прогнозирования урожайности с заблаговременностью от одного до трех месяцев до начала уборки.

Ключевые слова: подсолнечник, изменчивость урожайности, динамика, агрометеорологические факторы, прогноз урожайности

Agrometeorological conditions and forecasting of sunflower seed yield in the Central Federal District

A.I. Strashnaya, O.V. Bereza, P.S. Klang

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
ais@mecom.ru*

The dynamics of sunflower yield and its variability in the subjects of the Central Federal District for the period from 1996 to 2017 is studied. The rate of the yield increase due to crop farming and the yield variations due to weather conditions are analyzed. New physical and statistical models for predicting crop yields with a lead time of one to three months before harvesting are developed.

Keywords: sunflower, yield variability, dynamics, agrometeorological factors, yield forecast

Подсолнечник является основной масличной культурой в Российской Федерации, а в мире – третьей по значимости после сои и арахиса. Эта культура возделывается в 40 странах: в последние годы посевные площади под подсолнечником достигли 25,6 млн. га [3]. Значительный рост посевных площадей, занятых подсолнечником, наблюдается и в России. Если в 2001 г. они составляли 3,82 млн га, то в 2017 г. увеличились до 7,9 млн га. Расширению посевных площадей подсолнечника способствует высокая рентабельность его возделывания, что связано с увеличением спроса на масличное сырье как в России, так и за рубежом. Широкое

распространение этой культуры обусловлено, кроме того, большим содержанием жира (48–55 %), а также белка (20–23 %) в семенах и разнообразным ассортиментом продукции, вырабатываемой из семян [8, 9].

Основными производителями подсолнечника в Российской Федерации являются, как указывалось в [12], три федеральных округа: Южный (ЮФО), Приволжский (ПФО) и Центральный (ЦФО). В этих округах за последние пять лет (2013–2017 гг.) производилось в среднем около 89 % семян подсолнечника, из них на долю ЦФО приходится 27 %.

Валовой сбор семян подсолнечника в ЦФО за период с 2001 по 2017 г. увеличился от 0,6 до 2,4 млн т. Проведенный анализ динамики урожайности валовых сборов и площадей подсолнечника по областям показал, что столь значительное увеличение производства семян подсолнечника в округе произошло не только вследствие повышения урожайности, но и за счет роста посевных площадей. Так, в 2001 г. посевная площадь подсолнечника в округе составляла 0,67 млн га, а в 2017 г. – 1,42 млн га, т. е. увеличилась на 750 тыс. га.

Заметим, что в ЮФО увеличения посевных площадей подсолнечника в этот период практически не наблюдалось: в 2001 г. они составили 1,83 млн га, в 2017 г. – 1,87 млн га. В то же время в ПФО посевные площади увеличились более чем в три раза: с 1,06 до 3,46 млн га соответственно. Можно полагать, что столь значительный рост площадей, занятых подсолнечником в ЦФО и особенно в ПФО, связан не только с увеличением рентабельности возделывания подсолнечника в связи с наблюдавшимся в эти годы ростом урожайности, обусловленной внедрением новых более урожайных сортов и гибридов подсолнечника, но и в значительной степени с улучшением теплообеспеченности этих территорий в условиях глобального потепления. Так, в [4] показано, что северная граница сумм температур, необходимых для созревания большинства сортов подсолнечника, обеспеченная в 90 % лет, в ЦФО существенно продвинулась к северу и проходит по южным районам Брянской области, центральным районам Орловской, Тульской и Рязанской областей, где посевная площадь подсолнечника увеличилась с середины 2000-х гг. в 4–10 раз, тогда как ранее в этих субъектах подсолнечник для получения семян почти не возделывался или возделывался лишь в отдельных хозяйствах. В ПФО граница возможного возделывания подсолнечника продвинулась уже к северным границам Среднего Поволжья, почти до широты Казани [9], тогда как в 90-е годы подсолнечник возделывался в округе в основном южнее широты Самары.

Нами были проанализированы фактические данные фенологических наблюдений гидрометеостанций в годы с различными агрометеорологическими условиями (2010 г. – неблагоприятный и 2016 г. – благоприятный). Необходимо отметить, что достаточное количество таких наблюдений для анализа имеется только в Воронежской и Тамбовской областях, в остальных областях их количество весьма ограничено, а в нечерноземных

областях такие наблюдения пока практически не проводились. В результате проведенного анализа оказалось, что суммы активных температур за вегетационный период подсолнечника (от сева до созревания) в Белгородской и Воронежской областях в эти годы варьировали от 2045 °С до 2585 °С, средняя продолжительность этого периода составляла от 97 до 116 дней, а периода «всходы – цветение» – 62–67 дней. Согласно [5, 8], такие посевы можно характеризовать как среднеранние. На остальной территории округа (Курская, Орловская, Липецкая и Тамбовская области) суммы температур за период «сев – созревание» колебались в основном от 1523°С до 2036°С. Продолжительность периода «сев – созревание» составляла от 84 до 96 дней, а периода «всходы – цветение» – в основном 55–60 дней, т. е. в этих районах возделывались преимущественно скороспелые и раннеспелые сорта и гибриды.

Разнообразие возделываемых в субъектах сортов и гибридов подсолнечника, имеющих различные сроки наступления фенологических фаз (образования соцветий, цветения и созревания), затрудняет определение критических периодов для растений относительно погодных условий и установление связей между урожайностью и метеорологическими факторами, что создает трудности для разработки методов прогнозирования урожая. В таких условиях изменчивость урожайности обычно увеличивается. Исследована изменчивость урожайности подсолнечника в субъектах ЦФО за период 1996–2017 гг. (табл. 1).

Таблица 1. Изменчивость урожайности Y подсолнечника в областях ЦФО (1996–2017 гг.)

Table 1. Variability of yield of sunflower in the regions of the Central Federal District (1996-2017 years)

Территория	Средняя Y , ц/га	СКО, ц/га	Max Y , ц/га	Год	Min Y , ц/га	Год	V, %
Белгородская область	16,8	5,20	26,4	2016, 2013	10,9	1998	31
Воронежская	14,9	5,13	23,4	2016	8,3	1996	34
Курская	12,3	6,47	22,9	2016	4,2	1997	52
Липецкая	14,2	5,14	23,2	2011	7,4	1996	36
Тамбовская	11,7	4,62	19,1	2013, 2015	5,7	1996	39
Орловская	13,2	7,00	23,8	2013	3,6	2001	51

Можно видеть, что наиболее высокая средняя урожайность подсолнечника (16,8 ц/га), а также максимальная (26,4 ц/га) наблюдаются в Белгородской области, где растения хорошо обеспечены теплом, как и в Воронежской области, а обеспеченность влагой лучше, чем в последней. При этом необходимо отметить, что наибольший валовый сбор подсолнечника наблюдается в Воронежской области, где сосредоточены

и наибольшие в округе посевные площади этой культуры (около 460,0 тыс. га). Его величина составляет более трети валового сбора семян в целом по округу. В среднем за последние пять лет (2013–2017 гг.) валовой сбор составил 950,0 тыс. т, а максимальный валовый сбор был получен в 2013 г. Наиболее низкая урожайность характерна для Тамбовской области (11,7 ц/га).

Большой размах колебаний урожайности в эти годы (разность между максимальной и минимальной урожайностью) характерен для всех субъектов и составляет в основном от 13,4 до 18,7 ц/га. Наибольшая изменчивость урожайности наблюдалась в Курской и Орловской областях, где среднее квадратичное отклонение (СКО) составляет 6,47 и 7,00 ц/га соответственно, а коэффициенты вариации (V) – 51–52 %. В остальных областях округа СКО колеблется от 4,62 до 5,20 ц/га, а коэффициент вариации урожайности – от 31 до 39 %, что свидетельствует о неустойчивости урожайности подсолнечника в областях округа по годам в рассмотренный период (1996–2017 гг.).

Нами исследована также изменчивость урожайности подсолнечника в ЦФО по сравнению с другими округами-производителями семян этой культуры (в их современных границах) и Российской Федерации в целом за период 2001–2017 гг. Средняя урожайность подсолнечника в ЦФО за этот период оказалась значительно выше, чем в ПФО, и даже выше, чем в ЮФО и СКФО (Северо-Кавказском федеральном округе). Наибольшей в этом округе была и изменчивость урожайности: СКО составило 4,84 ц/га, вариация урожайности – 30 %. Самая низкая средняя урожайность оказалась в ПФО, а СКО в этом округе оказалось более чем в два раза меньше, чем в ЦФО. Вариация урожайности была наибольшей в ЦФО и ПФО: соответственно, 30 % и 24 % (табл. 2).

Таблица 2. Изменчивость урожайности и валовых сборов подсолнечника в Российской Федерации и федеральных округах (2001–2017 гг.)

Table 2. Variability of sunflower yield and gross yield in the Russian Federation and Federal districts (2001-2017)

Территория	Средняя Y, ц/га	СКО, ц/га	V, %	Средний W, млн т	СКО, ц/га	V, %
Российская Федерация	12,3	2,32	19	7,50	2,79	37
ЦФО	16,1	4,84	30	1,76	0,92	52
ЮФО	14,5	2,78	19	2,96	0,64	22
ПФО	9,3	2,22	24	2,07	1,25	60
СКФО	15,4	2,02	13	0,51	0,99	18

Наибольший валовый сбор (W, млн т) подсолнечника был в ЮФО, где он составил в среднем за 17 лет 2,96 млн т, вариация валовых сборов (22 %) была значительно меньше, чем в ЦФО (52 %) и ПФО (60 %).

В изменившихся агрометеорологических условиях в связи с глобальным потеплением и внедрением новых более продуктивных отечественных и зарубежных сортов и гибридов подсолнечника в конце девяностых – начале двухтысячных годов в данной работе ставилась задача разработать метод прогноза урожайности подсолнечника по областям ЦФО с большой заблаговременностью – три месяца и более до начала уборки. Большая заблаговременность связана с необходимостью планирования валовых сборов подсолнечника как для внутреннего потребления, так и для экспортных целей.

Анализ данных фенологических наблюдений гидрометеостанций показывает, что уборочная спелость подсолнечника в областях ЦФО наблюдается в среднем с 5 по 15 сентября. В связи с этим прогноз урожайности должен быть составлен в первой пятидневке июня. Для разработки метода прогноза использовался подход, изложенный в [12]. Исследовалось влияние на урожайность подсолнечника агрометеорологических условий и влияние культуры земледелия. Была сформирована база данных метеорологических и агрометеорологических показателей, осредненных по субъектам округа: температура воздуха, сумма осадков, коэффициенты увлажнения, запасы продуктивной влаги по месяцам вегетационного периода (май – август) за 1997–2017 гг. и средняя по области урожайность подсолнечника по данным Росстата [<http://www.gks>] за этот же период. Проведенный анализ временных рядов средней областной урожайности подсолнечника и динамики урожайности за период 1997–2017 гг. в областях округа показал значительный ее рост за счет повышения культуры земледелия, который вполне удовлетворительно аппроксимируется уравнением прямой.

В качестве примера динамика урожайности подсолнечника за период 1997–2017 гг., типичная для областей ЦФО, приведена на рис. 1а по Липецкой и Тамбовской областям, а на рис. 1б – по Белгородской области за тот же период и по ЦФО в целом (в современных границах) за 2001–2017 годы.

В нашей работе изменения урожайности в областях округа, связанные с повышением культуры земледелия, описаны, кроме того, уравнениями, приведенными в табл. 3. Выбор «наилучшего» уравнения тренда осуществлялся по величине коэффициента детерминации R^2 . По большинству областей R^2 как для линейной, так и для нелинейной связи были практически одинаковыми. Несколько различались они лишь в уравнениях по Белгородской и Тамбовской областям. Для этих областей в табл. 3 приведены оба типа уравнений. Увеличение урожайности подсолнечника от начала к концу периода, как видно из приведенной таблицы, составляло по областям от 12,27 ц/га (Тамбовская область) до 19,23 ц/га (Орловская область). Ежегодные приросты урожайности вследствие повышения культуры земледелия практически во всех областях составляли от 0,65 до 0,80 ц/га.

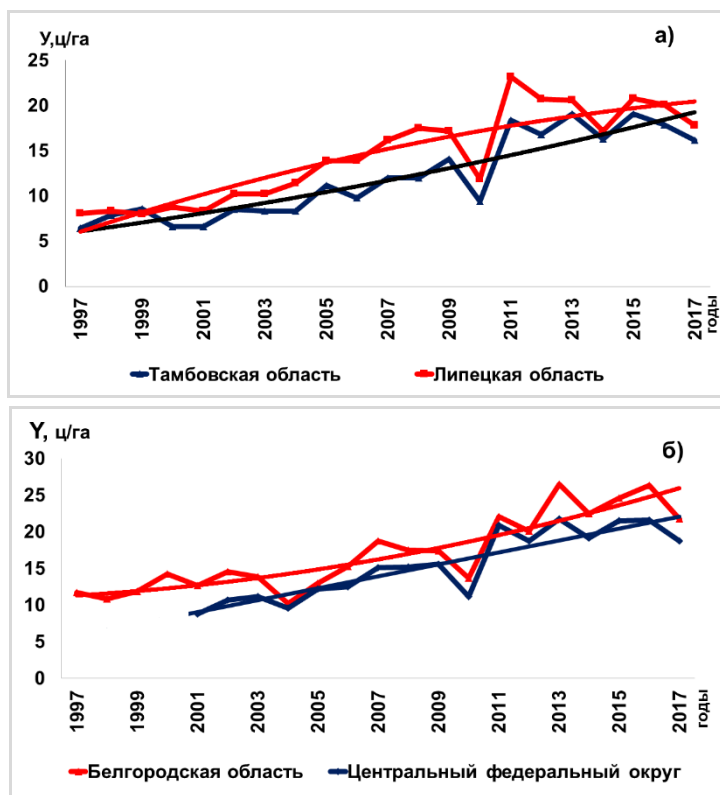


Рис. 1. Динамика урожайности подсолнечника (ц/га) в 1997–2017 гг.: по Липецкой и Тамбовской областям (а); Белгородской области и ЦФО (б).
Fig. 1. Dynamics of sunflower yield (c/ha) in Lipetsk and Tambov regions (1997–2017) (a); in the Belgorod region and the Central Federal District (b).

Таблица 3. Уравнения тенденций роста урожайности подсолнечника в областях ЦФО

Table 3. Equations of sunflower yield growth trends in the regions of the Central Federal District

Территория	Уравнения регрессии	R ²	Y, ц/га		Увеличение Y, ц/га
			1997	2017	
Белгородская область	$y=0,024x^2+0,156x+10,923^*$ $y=0,705x+8,763$	0,79	11,1	24,50	13,40
Воронежская	$y=0,023x^2+0,171x+9,062$	0,81	9,5	22,60	13,10
Курская	$y=0,016x^2+0,618x+2,669$	0,88	4,0	22,80	18,80
Липецкая	$y=-0,019x^2+0,187x+3,758$	0,79	5,2	20,41	15,21
Тамбовская	$y=0,009x^2+0,428x+5,190$ $y=0,649x+4,314$	0,81	5,6	18,27	12,27
Орловская	$y=0,005x^2+0,866x+2,228$	0,75	3,6	22,83	19,23

Примечание: x – порядковый номер года, x=1 для 1997 г.

Для выявления периодов, когда рост урожайности подсолнечника вследствие повышения культуры земледелия происходил наиболее интенсивно, были рассмотрены некоторые показатели, количественно характеризующие динамику временных рядов урожайности в областях округа: отклонение урожайности $\Delta Y_{тр}$ (ц/га) и темп роста тенденции урожайности Tr (%) [10]:

$$\Delta Y_{тр} = Y_{трj} - Y_{трj-k},$$

$$Tr = \frac{Y_{трj}}{Y_{трj-k}} \cdot 100,$$

где $Y_{трj}$ – значение урожайности по тренду в j -й год ($j=1,2,3\dots n$), ц/га; $Y_{трj-k}$ – базисный уровень, отстоящий от $Y_{трj}$ на k лет ($k=5$), ц/га.

В табл. 4 представлены значения средних характеристик абсолютного прироста урожайности по пятилетиям за 1997–2016 гг., ц/га и темпов роста (%).

Таблица 4. Динамика основных характеристик тенденции урожайности подсолнечника в областях ЦФО

Table 4. Dynamics of the main characteristics of the yield trend sunflower seeds in the regions of the Central Federal District

Территория	1997–2001	2002–2006	2007–2011	2012–2016
Белгородская область	<u>1,2*</u> 111	<u>2,4</u> 121	<u>3,1</u> 120	<u>4,1</u> 120
Воронежская	<u>1,2</u> 113	<u>2,5</u> 124	<u>3,1</u> 123	<u>3,9</u> 122
Курская	<u>1,8</u> 153	<u>3,5</u> 150	<u>4,2</u> 137	<u>4,8</u> 129
Липецкая	<u>3,2</u> 161	<u>3,5</u> 134	<u>2,7</u> 119	<u>1,9</u> 111
Тамбовская	<u>1,5</u> 127	<u>2,3</u> 128	<u>2,6</u> 123	<u>3,1</u> 121
Орловская	–	<u>3,8</u> 150	<u>4,0</u> 132	<u>4,2</u> 124

Примечание: * Цифры над чертой обозначают абсолютный прирост урожайности, ц/га, под чертой – темп роста, %.

Данные, приведенные в табл. 4, показывают, что в начале рассматриваемого периода (1997–2001 гг.) темпы роста урожайности подсолнечника в субъектах существенно различались. В Белгородской и Воронежской областях, где уже в этот период возделывался относительно широкий набор новых более продуктивных сортов и гибридов, темпы роста были небольшими, в остальных областях, где внедрение таких сортов и гибридов, а также использование новых технологий только начиналось, они

были значительными (127–161 %). В течение последующих лет наибольшими темпы роста урожайности практически во всех областях были в период 2002–2006 гг., что свидетельствует о массовом внедрении новых высокоурожайных сортов и гибридов зарубежной и отечественной селекции [1, 7, 9]. В 2007–2011 гг. и особенно в 2012–2016 гг. темпы роста урожайности несколько замедлились, что, по-видимому, связано с установлением относительной стабильности в использовании сортовых и гибридных семян подсолнечника. По данным [3], соотношение сортов и гибридов в последние годы составляет примерно 50:50. Абсолютные приросты урожайности в эти периоды, как и в пятилетие 2002–2006 гг., существенно различались и колебались в основном в пределах от 2,4 до 4,2 ц/га. Наибольшим (4,8 ц/га) абсолютный прирост урожайности подсолнечника наблюдался в пятилетие 2012–2016 гг. в Курской области, где в хозяйствах, кроме того, стали более широко применяться новые технологии возделывания подсолнечника [1], а наименьшим (1,9 ц/га) – в тот же период в Липецкой области.

Ранее нами было показано [12], что в районах недостаточного и неустойчивого увлажнения основной причиной значительного снижения урожайности подсолнечника чаще всего являются дефицит влаги и засухи, в северных районах его возделывания существенное значение имеет теплообеспеченность растений. Следует отметить, что высокие коэффициенты детерминации R^2 в уравнениях трендов (табл. 3) свидетельствуют о значительном вкладе в повышение среднеобластной урожайности подсолнечника культуры земледелия. Это подтверждают и данные абсолютного прироста урожайности по пятилетиям, приведенные в табл. 4. Однако при этом, как известно [10], весьма значима роль и случайной компоненты урожайности (отклонений урожайности от трендов), зависящей в основном от погодных условий и достигающей больших величин. Это хорошо видно на рис. 1а, где показана динамика урожайности по годам в Липецкой и Тамбовской областях и тренды урожайности.

Как указывалось выше, погодичные приросты урожайности вследствие повышения культуры земледелия в областях округа составляли десятые доли центнера (в основном от 0,65 до 0,80 ц/га). Величины случайной компоненты урожайности, т. е. как положительных, так и отрицательных отклонений от тренда (см. рис. 1а), достигали 2–4 ц/га, а в отдельные годы – до 5 ц/га и более. Так, например, в Липецкой области в очень сильную засуху 2010 г. отрицательное отклонение урожайности от тренда составило 5,1 ц/га, а в смежный (благоприятный) 2011 г. наблюдалось, напротив, положительное отклонение от тренда практически такой же величины. Почти такие же значения отклонений урожайности от трендов при значительном росте урожайности от начала к концу периода характерны для Белгородской (см. рис. 1б), Воронежской и других областей. На значительные колебания урожайности и качества семян подсолнечника в зависимости от условий теплообеспеченности и увлажнения

конкретного года выращивания подсолнечника указано в [2, 7, 8]. Сказанное выше обусловило необходимость более детального анализа погодных условий и их влияния на урожайность подсолнечника на территории округа.

Нами был проведен анализ условий увлажнения в субъектах округа на основе использования наиболее распространенного в агрометеорологии и агроклиматологии гидрометеорологического коэффициента увлажнения (ГТК Селянинова) по месяцам вегетационного периода подсолнечника. Он представляет собой отношение суммы осадков в мм за месяц или другой период ($\sum R$) к сумме температур за период со средними суточными температурами выше 10°C ($\sum t$) за тот же период, уменьшенной в 10 раз, которая принимается за условный показатель испаряемости ($\text{ГТК} = \sum R / 0,1 \sum t$).

Использовались также запасы продуктивной влаги в почве, однако в связи с ограниченным количеством данных наблюдений гидрометеостанций за влажностью почвы под подсолнечником в областях округа количественная оценка влияния влажности почвы на урожайность в данном случае была весьма затруднительной. Термический режим характеризовался в основном среднемесячными значениями температуры воздуха за май, июнь, июль и август. По каждому субъекту строились матрицы связей урожайности и отклонений (аномалий) урожайности от трендов с показателями, характеризующими условия увлажнения и термического режима.

При анализе матриц оказалось, что положительное влияние на урожайность термического фактора в наибольшей степени проявилось в период сева и появления всходов подсолнечника, а также в период его созревания. Коэффициенты корреляции рассчитанных аномалий урожайности со средней температурой за май составляли по рассматриваемым областям от 0,43 до 0,52; в июне и июле почти во всех областях они были слабее ($r = 0,26-0,30$), а на северо-востоке территории в июле они были отрицательными и выражены весьма слабо (значимыми на 5%-ном уровне является коэффициент корреляции от 0,41). Как указывалось в [8], более слабые связи вероятнее всего можно объяснить тем, что значения изучаемого фактора (в нашем случае температура воздуха) находятся в основном вблизи оптимальных величин для этого периода.

Значительное влияние температуры воздуха в мае можно, на наш взгляд, объяснить тем, что увлажнение почвы в мае почти всегда (в 80–90 % лет) бывает достаточным (запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы составляют 25–30 мм и более, в метровом 160–190 мм), а быстрое появление всходов зависит в основном от термического режима. Зависимость отклонений урожайности подсолнечника от температуры воздуха в мае показана на рис. 2. По данным ряда авторов [7, 13], дружное и равномерное появление всходов является «фундаментом» хорошего урожая. Зависимость урожайности подсолнечника от ГТК в мае–июле показана на рис. 3.

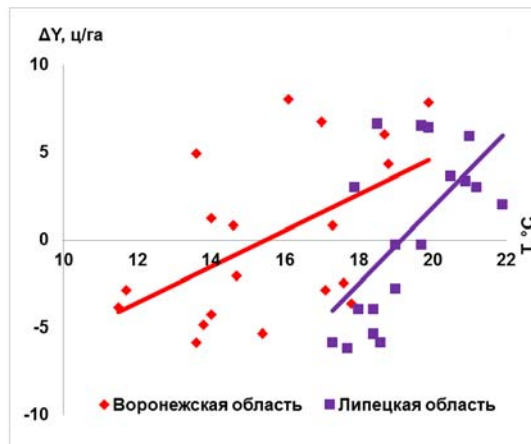


Рис. 2. Зависимость отклонений урожайности подсолнечника (ΔY) от температуры воздуха в мае по Воронежской и Липецкой областям за 1998–2017 гг.

Fig. 2. The dependence of the variance of productivity of sunflower (ΔY) from air temperature in May in Voronezh and Lipetsk regions for 1998–2017.

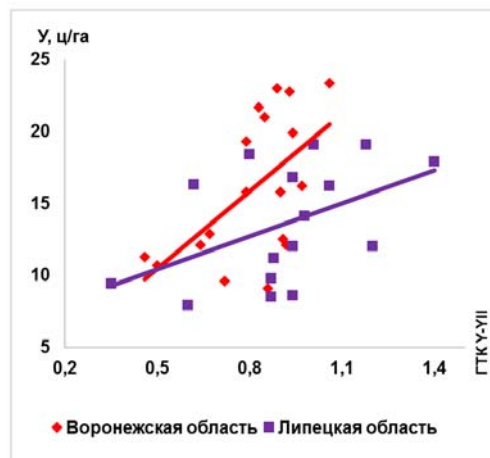


Рис. 3. Зависимость урожайности подсолнечника (Y , ц/га) от ГТК мая–июля по Воронежской и Тамбовской областям за 1998–2017 гг.

Fig. 3. The dependence of the yield of sunflower (Y , kg/ha) from GТK May–July in the Voronezh and Tambov regions for the years 1998–2017.

Приведем некоторые примеры влияния температуры воздуха в мае на урожайность подсолнечника. В Тамбовской области, например, когда средняя за май температура воздуха в 2013 г. составила 17,8 °С, урожайность подсолнечника была 16,8 ц/га. В более теплый май в 2013 г. температура в этом месяце составила 18,9 °С, что обеспечило более быстрое и равномерное появление всходов, урожайность составила 19,1 ц/га. В Липецкой области средняя за май температура составила в 2013 г.

18,6 °С, а урожайность – 20,6 ц/га, тогда как в 2014 г. май был более прохладным (температура 17,7 °С), урожайность – 17,2 ц/га. Понятно, что на конечную урожайность действовали и другие факторы, однако роль температуры воздуха в мае прослеживается довольно четко. Аналогичные примеры можно привести и для августа. В августе, когда завершается налив семян и начинается созревание, тесная связь урожайности со средней температурой в этом месяце ($r = 0,40-0,47$) связана с тем, что повышение температуры обеспечивает (при достаточном увлажнении) хорошую выполненность семян, ускорение и равномерность созревания подсолнечника, а это связано, кроме того, с уменьшением потерь при уборке. Слабо выраженные связи урожайности с температурой воздуха в июле в определенной степени объясняются, на наш взгляд, разными сроками наступления фаз развития, и особенно наиболее важной фазы – «цветение», различных по скороспелости сортов и гибридов, возделываемых в областях, а также разными сроками сева.

С целью определения изменения основных показателей термического режима за последнее 30 лет, нами были проведены расчеты и анализ средней температуры воздуха за май и август по периодам 1988–2002 и 2003–2017 гг. Оказалось, что во всех областях наблюдался существенный рост средней по областям температуры во втором периоде, как в мае, так и в августе, т. е. в наиболее ответственные месяцы для формирования урожайности подсолнечника (табл. 5). Увеличение средней за май температуры воздуха во втором периоде по сравнению с первым составило по области от 1,9 °С до 2,5 °С, а в августе от 1,9 °С до 2,3 °С, т. е. температура в эти месяцы во втором периоде увеличилась практически на 2,0 °С, что благоприятно сказывалось на урожайности подсолнечника, способствовало, наряду с улучшением культуры земледелия, ее росту в рассматриваемый период.

Таблица 5. Изменение температуры воздуха (°С) в мае и августе в субъектах ЦФО (1988–2017 гг.)

Table 5. The change in air temperature (°C) in May and August in the Central Federal District (1988-2017)

Территория	Средние значения температуры воздуха, °С			
	Май		Август	
	1988–2002	2003–2017	1988–2002	2003–2017
Белгородская область	13,8	15,8	18,6	20,6
Воронежская	13,9	16,4	19,1	21,4
Курская	13,3	15,3	17,9	19,8
Липецкая	13,6	15,6	17,8	20,1
Тамбовская	13,8	17,3	18,0	20,3
Орловская	12,9	14,8	17,3	19,2

Роль осадков в мае, июне и июле была в основном ниже и около уровня значимой. В августе в большинстве областей, особенно на северо-востоке и юге территории, она была достаточно тесной ($r = 0,36-0,43$). Влияние ГТК в мае на урожайность подсолнечника проявлялось по-разному. Теснота связей этого показателя с урожайностью была в основном на уровне значимой: в большинстве областей она оказалась положительной, в Белгородской и Липецкой областях – отрицательной. Объяснить это для названных областей, по-видимому, можно тем, что здесь при больших значениях ГТК (более 1,2) чаще наблюдалось сильное переувлажнение почвы, всходы при этом бывают неравномерными, изреженными, густота растений уменьшается [9], что может привести к снижению урожая.

Более значимыми для формирования урожая в большинстве областей оказались условия увлажнения за основной период вегетации подсолнечника, характеризуемые средним значением ГТК за май – июль. Коэффициенты корреляции урожайности с ГТК колебались от 0,43 до 0,48. В связи с этим анализ условий увлажнения в областях за последние 30 лет был проведен на основе использования среднего ГТК_{V-VII}. Расчетные средние значения этого показателя за период 2003–2017 гг. сравнивались с таковыми за 1988–2002 гг. В ряде областей выявилась тенденция ухудшения условий увлажнения в период 2003–2017 г., но в большинстве областей она была незначительной (табл. 6). Так, наиболее существенное (на 10–19 %) уменьшение ГТК_{V-VII} в этот период наблюдалось в Белгородской, Липецкой, Орловской областях. В Воронежской, Курской и Тамбовской областях уменьшение было лишь на 3–6 %.

Таблица 6. Условия увлажнения в субъектах ЦФО в мае–июле (1988–2017гг.)

Table 6. Moisture conditions in the Central Federal District in May–July (1988-2017)

Территория	Среднее значение ГТК _{V-VII}		Повторяемость ГТК _{V-VII} ≤ 0,80, %		
	1988–2002	2003–2017	1988–2002	2003–2017	1988–2017
Белгородская область	1,12	1,01	13	13	13
Воронежская	0,94	0,93	40	27	33
Курская	1,19	1,13	13	13	13
Липецкая	1,16	0,94	7	20	13
Тамбовская	1,07	1,01	27	20	23
Орловская	1,38	1,22	0	7	3

В табл. 6 показано изменение вероятности (повторяемость, %) засух средней интенсивности, которые характеризуются ГТК ≤ 0,80 [11, 14], по указанным выше периодам и в целом за период. Чаще всего (в 2–3 годах

из десяти) период май–июль был засушливым в основном на востоке округа (Воронежская, Тамбовская области), в остальных областях он был засушливым не более одного раза в десять лет. Повторяемость засушливых периодов (май–июль) в 2003–2017 гг. по сравнению с 1988–2008 гг. практически не менялась в Белгородской и Курской областях, в Тамбовской и Воронежской областях она даже уменьшилась, а увеличение повторяемости таких засух наблюдалось лишь в Орловской и Липецкой областях. Влияние засух на урожайность сельскохозяйственных культур рассматривалось в [6, 11, 14].

Рассмотрим некоторые примеры, когда наблюдалось значительное снижение урожайности подсолнечника в годы с засушливым периодом май–июль. Так, в Воронежской области, например, когда в июне–июле 2010 г. наблюдался значительный дефицит осадков (33 и 37 % нормы соответственно), обусловивший при повышенном температурном режиме очень сильную атмосферную засуху в эти месяцы (ГТК равен 0,27 и 0,29 соответственно), а средний ГТК за май–июль составил 0,46, что соответствует сильной засухе [14], отклонение урожайности от тренда составило более 6,0 ц/га. Фактическая урожайность была очень низкой (11,3 ц/га). В смежном, более благоприятном по условиям увлажнения 2011 г., когда атмосферная засуха в мае и в июне была средняя по интенсивности – 0,69 и 0,70, средний ГТК за май–июль составил 0,83 (в июле было достаточное увлажнение, ГТК = 1,09), отклонение урожайности от тренда составило около 4,0 ц/га. Фактическая урожайность в этом году была почти в два раза больше, чем в 2010 г., и составила 21,7 ц/га.

Почти такая же ситуация в эти годы наблюдалась в других субъектах. В Липецкой области, например, когда в 2010 г. количество осадков в июне и июле составило, соответственно, 23 и 66 % нормы, а средний ГТК за май–июль был 0,49 (сильная засуха), урожайность подсолнечника составила 11,9 ц/га; в 2011 г., когда средний ГТК за май–июль был 0,69 (средняя засуха), урожайность составила 23,2 ц/га. Значительные отклонения урожайности от трендов наблюдались в Липецкой области, как и в других областях, и в менее контрастные смежные годы. В 2013 г., когда средний ГТК за май–июль составил 1,05 (достаточное увлажнение), урожайность подсолнечника была 20,6 ц/га, а в 2014 г. при значениях среднего ГТК в эти месяцы, равном 0,81 (слабая засушливость), – 17,2 ц/га.

Результаты проведенных исследований влияния метеорологических и агрометеорологических факторов на урожайность семян подсолнечника в областях ЦФО позволили разработать долгосрочный метод прогноза урожайности подсолнечника с учетом выявленных наиболее тесных связей урожайности с указанными факторами. Выявлено не только влияние погоды (термического режима и увлажнения территории на урожайность подсолнечника), но и значительное влияние культуры земледелия (вследствие внедрения новых более продуктивных сортов и гибридов подсолнечника и новых технологий). Задача разработки метода прогнозирования

урожайности решались на основании расчетов (прогноза) двух компонентов урожайности: $Y_{тр}$ – урожайности по тренду и ΔY – прогноза отклонений урожайности от тренда.

Ожидаемая урожайность подсолнечника ($Y_{пр}$), таким образом, будет состоять из урожайности, рассчитанной по уравнениям трендов, построенных нами для каждой области ($Y_{тр}$), где подсолнечник возделывают на значительных площадях, и отклонений урожайности (ΔY), рассчитанных по разработанным прогностическим моделям, т. е.

$$Y_{пр} = Y_{тр} + \Delta Y .$$

Основными параметрами этих моделей являются среднемесячные значения температуры воздуха T и гидротермический коэффициент увлажнения ГТК по месяцам основного вегетационного периода вегетации подсолнечника (май–август), а также средний ГТК за май–июль. Указанные параметры (T , ГТК) рассчитываются в автоматизированном режиме по алгоритму, включенному в состав рабочего места (РМ) агрометеоролога (пакет программ «ПРОМЕТЕЙ», «Статистика России»), что значительно ускоряет расчеты.

Первый долгосрочный прогноз урожайности подсолнечника (табл. 7) может быть составлен 1 июня, т. е. более чем с трехмесячной заблаговременностью до уборки, так как уборка подсолнечника в округе начинается в основном с середины сентября. При известной посевной площади в этот период можно рассчитать и ожидаемый валовый сбор семян подсолнечника. Большая заблаговременность прогноза дает возможность хозяйствующим субъектам планировать ожидаемый валовой сбор семян подсолнечника (если известна посевная площадь культуры) для потребления в регионе, а также для формирования рынка семян.

Таблица 7. Коэффициенты регрессии в прогностических моделях урожайности и множественные коэффициенты корреляции (прогноз 1 июня)

Table 7. Regression coefficients in predictive yield models and multiple correlation coefficients (June 1 forecast)

Территория	Урожайность подсолнечника (в отклонениях от тренда), ц/га			
	a_1	a_2	C	R
Белгородская область	0,405	-4,174	-1,930	0,528
Воронежская	1,168	3,509	-21,811	0,606
Курская	1,639	4,632	-28,194	0,590
Липецкая	1,118	-0,830	-15,335	0,558
Орловская	1,387	1,425	-29,431	0,506
Тамбовская	0,456	1,618	-9,532	0,493

Примечание. a_1 – коэффициент при T_5 ; a_2 – коэффициент при ГТК₅; C – свободный член уравнения; R – множественный коэффициент корреляции.

Уточнить прогноз 1 августа (табл. 8) можно по прогностическим моделям, которые учитывают наиболее значимые предикторы, по фактическим данным наблюдений гидрометстанций, рассчитанным за май–июль, и данным об ожидаемой температуре воздуха по прогнозу погоды на август.

Таблица 8. Коэффициенты регрессии в прогностических моделях урожайности и множественные коэффициенты корреляции (прогноз 1 августа)

Table 8. Regression coefficients in predictive yield models and multiple correlation coefficients (August 1 forecast)

Территория	Урожайность подсолнечника (в отклонениях от тренда), ц/га							
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	C	R
Белгородская область	0,514	2,984	-0,045				-2,099	0,580
Воронежская				23,177	1,216	0,244	-48,239	0,780
Курская				13,849	0,971	0,211	-36,655	0,710
Липецкая	0,846	-0,460	0,055				-14,619	0,661
Орловская				3,854	2,087	0,709	-53,868	0,609
Тамбовская	0,183		0,041			0,933	-23,920	0,577

Примечание. a_1 – коэффициент при T_5 ; a_2 – коэффициент при $ГТК_5$; a_3 – коэффициент при R_7 ; a_4 – коэффициент при $ГТК_{5-7}$; a_5 – коэффициент при T_6 ; a_6 – коэффициент при T_8 ; C – свободный член уравнения; R – множественный коэффициент корреляции.

Проверка прогностических долгосрочных моделей на зависимых материалах показала вполне удовлетворительные результаты, в 81–90% случаев ошибки прогнозов не превышали $0,8\sigma$.

Для примера на рис. 4 представлены результаты расчетов урожайности подсолнечника (Y , ц/га) по разработанной модели (прогноз 1 июня) с использованием кросс-валидации на зависимом материале (2001–2017 гг.) для Белгородской области. Коэффициент корреляции между фактическими и расчетными значениями урожайности равен 0,85.

Выводы

В результате исследований выявлены основные метеорологические факторы, которые вносят наибольший вклад в формирование урожайности подсолнечника. Показаны изменчивость урожайности и валового сбора подсолнечника в областях ЦФО и тенденции урожайности за период 1997–2017 гг. Определен вклад повышения культуры земледелия в современных условиях и метеорологических факторов. Показано, что колебания урожайности в неблагоприятные по погодным условиям годы значительно превосходят погодичные приросты урожайности за счет культуры земледелия. Выявлено в 2003–2017 гг. по сравнению с периодом

1988–2002 гг. значимое повышение средней по областям температуры воздуха в мае и в августе, в наиболее важные периоды для формирования урожая: в мае – сев, появление и рост всходов; в августе – период налива и начала созревания, что положительно сказалось на урожайности подсолнечника и позволяло вводить в севооборот на территории округа не только скороспелые, но и более продуктивные среднеспелые сорта и гибриды. Показано также, что изменение условий увлажнения в основной период вегетации подсолнечника (май–июль) в эти периоды в большинстве областей было незначительным (средний ГТК_{v-vii} уменьшился на 3–6 %).



Рис. 4. Фактические и расчетные значения урожайности подсолнечника (ц/га) в Белгородской области.

Fig. 4. Actual and estimated crop yields sunflower (Y, t/ha) in the Belgorod region.

Разработан долгосрочный метод прогноза урожайности подсолнечника по областям округа с трехмесячной заблаговременностью, что позволяет хозяйствующим субъектам с большой заблаговременностью планировать не только обеспечение региона, но и возможности экспорта. Предложен метод, позволяющий уточнить прогноз за месяц-полтора до начала уборки.

Список литературы

1. *Большисов Е.А., Бушнев А.С.* Продуктивность гибридов подсолнечника в Курской области и Краснодарском крае в зависимости от норм высева семян и применения минеральных удобрений // Масличные культуры. Науч.-техн. бюл. ВНИИМК. 2017. Вып. 1 (169). С. 58-63.
2. *Бочковой А.Л., Перетогин Е.А., Хатнянский В.Н., Камардин В.А., Крюкова Е.С.* Влияние репродукции генетической структуры сорта и условий года выращивания на качество семян подсолнечника // Масличные культуры. Науч.-техн. бюл. ВНИИМК. 2017. Вып. 2 (170). С. 3-12.

3. Бочковой А.Л., Перетогин Е.А., Хатнянский В.Н., Камардин В.А. Дополнительные критерии оценки типичности сортов подсолнечника в звеньях первичного и промышленного семеноводства // Масличные культуры. Науч.-техн. бюл. ВНИИМК. 2017. Вып. 3 (171). С. 3-11.
4. Вильфанд Р.М., Страшная А.И., Береза О.В. О динамике агроклиматических показателей условий сева, зимовки и формирования урожая основных зерновых культур // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 360. С. 45-78.
5. Вислобокова Л.Н., Мустафин И.И., Иванов С.В. О селекции подсолнечника в Тамбовском ВНИИСХ // М.К. Науч.-техн. бюл. ВНИИМК. 2017. Вып. 2 (170). С. 20-26.
6. Клещенко А.Д. Современные проблемы мониторинга засух // Труды ВНИИСХМ. 2000. Вып. 33. С. 3-13.
7. Лукомец В.М., Бушнев А.С., Подлесный С.П., Мамырко Ю.В., Ветер В.И., Семеренко М.К. Оценка продуктивности подсолнечника в зависимости от некоторых элементов технологии возделывания на чернозёмах Западного Предкавказья // Масличные культуры. Науч.-техн. бюл. ВНИИМК. 2016. Вып. 4 (168). С. 36-44.
8. Макляк Е.Н., Кириченко В.В. Реакция гибридов подсолнечника разных групп спелости на температурный режим периода их вегетации // Масличные культуры. Науч.-техн. бюл. ВНИИМК. 2016. Вып. 4 (168). С. 55-60.
9. Низамов Р.М., Сагдиев Р.С. Продуктивность подсолнечника в зависимости от нормы высева в условиях Республики Татарстан // Вестник Казанского ГАУ. 2011. № 1 (19). С. 144-146.
10. Полевой А.Н. Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 313 с.
11. 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.
12. Страшная А.И., Богомоллова Н.А., Тищенко В.А., Павлова К.И., Тебуев Х.Х. Агрометеорологические условия и прогнозирование урожайности семян подсолнечника в Приволжском федеральном округе // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 359. С. 142-160.
13. Суворова Ю.Н. Оценка урожайности сортообразцов подсолнечника селекции Сибирской опытной станции ВНИИМК по параметрам экологической пластичности и стабильности в южной лесостепи Западной Сибири // Масличные культуры. Науч.-техн. бюл. ВНИИМК. 2017. Вып. 3 (171). С. 29-35.
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.

References

1. Boldisov E.A., Bushnev A.S. Productivity of sunflower hybrids in Kursk and Krasnodar regions depending on the seed sowing rates and mineral fertilizers application. *Maslichnye kul'tury. Nauch.-tekhn. byul. VNIIMK* [Oil crops. Scientific and technical Bulletin of VNIIMK], 2017, vol. 169, no. 1, pp. 58-63 [in Russ.].
2. Bochkovoy A.D., Peretyagin E.A., Khatnyansky V.I., Kamardin V.A., Kryukova E.S. Influence of the seed reproduction, genetic structure of a variety and conditions of a year of cultivation on sunflower seeds quality. *Maslichnye kul'tury. Nauch.-tekhn. byul. VNIIMK* [Oil crops. Scientific and technical Bulletin of VNIIMK], 2017, vol. 170, no. 2, pp. 3-12 [in Russ.].
3. Bochkovoy A.D., Peretyagin E.A., Khatnyansky V.I., Kamardin V.A. Additional criteria for estimation of sunflower varieties uniformity in production of foundation and certified seeds. *Maslichnye kul'tury. Nauch.-tekhn. byul. VNIIMK* [Oil crops. Scientific and technical Bulletin of VNIIMK], 2017, vol. 171, no. 3, pp. 3-11 [in Russ.].
4. Vilfand R.M., Strashnaya A.I., Bereza O.V. About the dynamics of the agroclimatic indicators of conditions of sowing, wintering and formation of the yield of the main grain crops. *Trudy Gidrometsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2016, vol. 360, pp. 45-78 [in Russ.].

5. *Vislobokova L.N., Mustafin I.I., Mazurina Z.I., Ivanov S.V.* About sunflower breeding in the Tambov Research Institute of Agriculture. *Maslichnye kul'tury. Nauch.-tekhn. byul. VNIIMK [Oil crops. Scientific and technical Bulletin of VNIIMK]*, 2017, vol. 170, no. 2, pp. 20-26 [in Russ.].

6. *Kleshchenko A.D.* Sovremennye problemy monitoringa zasuh. *Trudy VNIISKHM*, 2000, vol. 33, pp. 3-13. [in Russ.].

7. *Lukomets V.M., Bushnev A.S., Podlesny S.P., Mamyrko Yu.V., Veter V.I., Semerenko S.A.* Assay of sunflower genotypes productivity depending on some elements of cultivation technology on black soils of the Western Ciscaucasia. *Maslichnye kul'tury. Nauch.-tekhn. byul. VNIIMK [Oil crops. Scientific and technical Bulletin of VNIIMK]*, 2016, vol. 168, no. 4, pp. 36-44 [in Russ.].

8. *Maklyak E.N., Kirichenko V.V.* Responce of sunflower hybrids of different maturity groups on the temperature regimen during vegetative period. *Maslichnye kul'tury. Nauch.-tekhn. byul. VNIIMK [Oil crops. Scientific and technical Bulletin of VNIIMK]*, 2016, Vol. 168, no. 4, pp. 55-60 [in Russ.].

9. *Nizamov R.M., Sagdiyev R.S.* Sunflower productivity depending of seeding rates in the Republic of Tatarstan. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*, 2011, vol. 19, no. 1, pp. 144-146 [in Russ.].

10. *Polevoy A.N.* Prikladnoe modelirovanie i prognozirovanie produktivnosti posevov. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1988, 313 p. [in Russ.].

11. *Strashnaya A.I., Korenkova N.V.* O zasushlivosti v Srednem Povolzh'e i ee vliyaniu na urozhaynost' yarovoy pshenitsy. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2005, vol. 340, pp. 25-34 [in Russ.].

12. *Strashnaya A.I., Tishishenko V.A., Bogomolova N.A., Pavlova K.I., Tebuev H.H.* Agrometeorological conditions and forecasting of productivity of sunflower seeds in the Privolzhskiy Federal District. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 359, pp. 142-160 [in Russ.].

13. *Suvorova Yu.N.* Estimation of yield of sunflower variety samples bred at the Siberian experimental station of VNIIMK by ecological plasticity and stability in the Southern forest-steppe of the Western Siberia. *Maslichnye kul'tury. Nauch.-tekhn. byul. VNIIMK [Oil crops. Scientific and technical Bulletin of VNIIMK]*, 2017, vol. 171, no. 3, pp. 29-35 [in Russ.].

14. *Ulanova E.S., Strashnaya A.I.* Zasuhi v Rossii i ih vliyanie na urozhaynost' zernovykh kul'tur. *Trudy VNIISKHM*, 2000, vol. 33, pp. 64-83 [in Russ.].

Поступила в редакцию 04.08.2019 г.

Received by the editor 04.08.2019.