

сценариев нельзя получить того объема исходной информации, который требуется для расчетов влияния изменений климата на урожайность по моделям, используемым при краткосрочном агрометеорологическом прогнозировании.

Анализ динамики урожаев сельскохозяйственных культур за относительно продолжительные периоды в разных регионах показывает, что изменения урожайности вызываются тремя главными факторами: пространственной неоднородностью агроклиматического потенциала территорий, совершенствованием агротехнологий и, наконец, сменой погодных условий из года в год. Изменения урожайности, происходящие под воздействием первых двух факторов, в силу их понятной территориальной вариабельности и относительно плавной временной зависимости можно рассматривать как детерминистические. По сравнению с ними нерегулярные межгодовые изменения урожаев следует исследовать как стохастический процесс.

В заключении следует указать на главные выводы из имеющихся расчетов изменений агроклиматических показателей в будущем. Первый из них состоит в том, что развивающееся антропогенное глобальное потепление в целом должно благоприятно повлиять на агроклиматический потенциал большинства сельскохозяйственных регионов мира. Второй вывод, который и ранее подтверждался расчетами применительно к отдельным сельскохозяйственным регионам Северного полушария, состоит в том, что глобальное потепление, приводящее в целом к росту осадков, наиболее благоприятным образом повлияет на агроклиматический режим регионов, которые в настоящее время характеризуются недостаточным увлажнением. Это обстоятельство является весьма важным для обоснования интенсивного развития зернового производства на больших площадях, ныне мало пригодных для сельского хозяйства засушливых регионов. И, наконец, следует упомянуть о том, что главной причиной неопределенности в выводах о потенциале продуктивности мирового производства продовольствия (в особенности сельского хозяйства отдельных регионов) в настоящее время остается непредсказуемость межгодовой изменчивости погодноклиматических факторов, которая все еще не поддается научному анализу.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХОЗЯЙСТВЕННО ЦЕННЫХ ПРИЗНАКОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Л. Ю. Новикова

ГНУ ВНИИР им. Н. И. Вавилова Россельхозакадемии

Актуальной задачей современного растениеводства является его адаптация к наблюдающимся изменениям климата, оптимизация видовой и сортовой структуры регионального растениеводства (Гордеев и др., 2008). Для прогнозирования хозяйственно ценных признаков сельскохозяйственных культур необходима количественная оценка их реакции на происходящие изменения. Целью

данного исследования является повышение прогностических способностей регрессионного анализа хозяйственно ценных признаков с помощью развиваемых в эконометрике методов анализа временных рядов (Елисеева и др., 2007).

Метод исследования. Изменения климата, начавшиеся в 70-х гг., происходят на фоне агротехнических трендов, что может привести к искажению регрессионных моделей. Существует несколько способов исключения тенденций из исследуемых рядов: включение в регрессионную модель времени в явном виде, анализ связей отклонений от трендов, анализ переменных в разностях (Руководство по агрометеорологическим прогнозам, 1984; Николаев, 1994; Сиротенко и др., 2011). Анализ отклонений от трендов представляется сложным из-за возможно нелинейного характера агротехнических трендов в России в последние 30 лет, поэтому он не был использован. В исследовании были использован регрессионный анализ как с включением времени в явном виде, так и анализ в разностях. Предположим, что зависимость хозяйственно ценного признака y в момент времени t y_t аппроксимируется линейной зависимостью от климатической характеристики K_t , с коэффициентом регрессии b_K , и y_t линейно растет со временем с повышением уровня агротехники со скоростью b :

$$y_t = a + b_K K_t + bt.$$

Тогда анализ связи скоростей изменения переменных за год (первых разностей) позволяет определить коэффициент регрессии исходных уровней b_K хозяйственно ценного признака и климатической характеристики:

$$\Delta_t y = y_t - y_{t-1} = b_K (K_t - K_{t-1}) + b = b_K \Delta_t K + b.$$

При параболическом агротехническом тренде климатические зависимости выявляются при переходе к регрессии во вторых разностях, т.е. анализу связей разностей первых разностей (данный случай был исследован при анализе ряда длиной 37 лет). Для синхронно наблюдаемых хозяйственно ценных признаков различных сортов и культур (панельных данных) были построены объединенные модели исследованных образцов в разностях. Данные модели позволили получить обобщенный прогноз и оценить вклад различных агроклиматических факторов в изменчивость хозяйственно ценных признаков зерновых культур.

Было установлено наличие трендов климатических характеристик и хозяйственно ценных признаков. Для каждого исследованного пункта и каждого сорта методом регрессии с последовательным включением переменных в пакете StatSoft Statistica 6.0 были построены регрессионные модели зависимости хозяйственно ценных признаков от климатических характеристик. В качестве возможных предикторов исследовались среднемесячные среднесуточные температуры и суммы осадков за месяц и обобщенные агроклиматические характеристики: даты устойчивого перехода температур через 10°C и 15°C , продолжительность периодов между ними, суммы температур и осадков в данные периоды, номер года. Указанные обобщенные характеристики дали возможность сравнивать и объединять результаты, полученные в географических пунктах с

различными датами посева. По полученным уравнениям были построены прогнозы.

Материалом для исследования послужили длинные (около 30 лет) ряды наблюдений за хозяйственно ценными признаками трех сортов пшеницы, семи сортов овса, двух сортов ячменя, являющихся стандартами при изучении коллекции ВИР. Были использованы данные четырех контрастных по климатическим условиям подразделений ВИР: Пушкинские лаборатории, бывшее (до 2008 г.) Московское отделение, Екатерининская опытная станция (Тамбовская обл.), Кубанская опытная станция (Краснодарский край). Были исследованы данные по 20 сортам винограда различного происхождения из коллекции ВНИИВиВ им. А. Я. Потапенко (Ростовская обл.) (Новикова и др., 2013). У зерновых были проанализированы: продолжительность периодов «всходы – созревание», «всходы – колошение», «колошение – созревание»; высота растения; масса 1000 зерен; масса зерна с 1 м^2 . У винограда была исследована продолжительность периода от распускания почек до полной зрелости ягод.

Результаты. Во всех исследованных пунктах наблюдался достоверный рост летних температур, в частности сумм температур выше $5, 10, 15^\circ\text{C}$, а в Ростовской обл. – 20°C . Осадки в течение лета менялись недостоверно, существенное влияние оказало лишь возрастание осадков в засушливых условиях Тамбовской обл. В Санкт-Петербурге и Краснодарском крае значимо увеличилась продолжительность периода с температурами от 5 до 15 и от 10 до 15°C весной. В Пушкинских лабораториях все исследованные сорта зерновых продемонстрировали тенденцию к сокращению вегетации. При более ранних датах посева наблюдались более ранние даты всходов, колошения, созревания. Сокращение вегетации происходило за счет снижения продолжительности периода «колошение – созревание», при этом период от всходов до колошения слабо удлинялся. Наблюдалось слабое уменьшение массы 1000 зерен у всех исследованных сортов зерновых, ряд отрицательных тенденций в динамике высоты и массы зерна с 1 м^2 , резкое повышение массы зерна с 1 м^2 и высоты растения. В остальных пунктах тенденции изменчивости зерновых были недостоверными и разнонаправленными. У всех исследованных сортов винограда из коллекции ВНИИВиВ отмечено снижение продолжительности периода от распускания почек до полной зрелости ягод, которое происходило за счет сокращения периода от начала созревания до полной зрелости ягод.

Регрессионные модели. Модели продолжительности вегетации были построены в исходных уровнях, переход к первым разностям незначительно, но всегда увеличивал коэффициент детерминации. Исключением явилась станция в Московской обл., где в уравнение регрессии вошел фактор времени в явном виде, поэтому модель имела больший коэффициент детерминации в первых разностях. Возможной причиной является рост уровня агротехники в 2000-е гг.

В каждом исследованном пункте модели продолжительности вегетации овса, пшеницы и ячменя имели сходные спецификации. Важнейшими для зерновых климатическими факторами оказались характеристики периода с высокими (более 15°C) температурами. Рост сумм эффективных температур выше 15°C ($\Sigma T_{\text{эф}15}$) повсеместно вызывал сокращение вегетационного периода у адап-

тированных к условиям конца прошлого века сортов. В засушливых условиях Тамбовской обл. вегетация удлинялась под действием роста сумм осадков за данный период (P_{15}). В Краснодарском крае влияние роста летних температур было компенсировано увеличением продолжительности весеннего периода с температурами от 5 до 15°C (L_{5-15}), в Московской обл. – с температурами 10–15°C (L_{10-15}). Общность предикторов позволила сформулировать обобщенные уравнения для продолжительности вегетации (L) овса, пшеницы, ячменя на каждой станции в разностях (Δ):

Пушкинские лаб. ВИР:	$\Delta L = 0,297 - 0,089 \Delta \Sigma T_{\text{эф}15}$	$R^2 = 0,67.$
Московское отд. ВИР:	$\Delta L = 0,836 - 0,052 \Delta \Sigma T_{\text{эф}15} + 0,145 \Delta L_{10-15}$	$R^2 = 0,53.$
Екатерининская ОС ВИР:	$\Delta L = 0,090 - 0,034 \Delta \Sigma T_{\text{эф}15} + 0,014 \Delta P_{15}$	$R^2 = 0,58.$
Кубанская ОС ВИР:	$\Delta L = -0,851 + 0,242 \Delta L_{5-15} - 0,013 \Delta \Sigma T_{\text{эф}15}$	$R^2 = 0,52.$

При объединении предикторов указанных четырех уравнений было получено объединенное уравнение исследованных сортов овса, пшеницы и ячменя, обобщающее данные 251 наблюдения:

$$\Delta L = 0,173 - 0,051 \Delta \Sigma T_{\text{эф}15} + 0,170 \Delta L_{10-15} + 0,007 \Delta P_{15} \quad R^2 = 0,52.$$

Частный коэффициент детерминации температурами составил 40%, продолжительностью весеннего периода с температурами 10–15°C – 11%, вклад осадков составил всего 1% для зерновых на ЕТ РФ.

Продолжительность периода от распускания почек до полной зрелости ягод (L) винограда сокращалась, в основном, с ростом температур, причем для винограда (как более южной культуры) это оказались температуры выше 20°C. Сказалось очень слабое сокращение периода с температурами от 10 до 15°C весной. Общий характер регуляции позволил составить объединенное уравнение для 20 сортов:

$$\Delta L = -0,154 - 0,013 \Delta \Sigma T_{20} + 0,353 \Delta L_{10-15} \quad R^2 = 0,40.$$

Модели формирования высоты растения менее детерминированы климатическими факторами и улучшаются при переходе к анализу в разностях. Для исследованных сортов овса, пшеницы, ячменя на четырех станциях (H) зависимость высоты от температур также была самой значимой:

$$\Delta H = -0,103 - 0,084 \Delta \Sigma T_{\text{эф}15} \quad R^2 = 0,32$$

Масса 1000 зерен оказалась наименее моделируемой величиной. За редким исключением не удалось построить уравнений регрессии, что, возможно, является следствием консервативности данного признака и опосредованного характера его формирования. Масса зерна с 1м² (Y) определялась эффективностью прохождения вегетативного и генеративного этапов посредством зависимости от высоты растения и массы 1000 зерен:

$$\Delta Y = -3,477 + 4,020 \Delta H + 7,7677 \Delta M_{1000} \quad R^2 = 0,32.$$

По построенным моделям и рассчитанным трендам агроклиматических показателей были построены климатически обусловленные прогнозы дальнейшей динамики хозяйственно ценных признаков, которые получились отрицательными. При сохранении продолжающихся тенденций тепловлагообеспечен-

ности на основании построенных моделей можно прогнозировать сокращение вегетации и уменьшение урожайности районированных ранее сортов зерновых. При увеличении возможного периода вегетации могут быть востребованы более позднеспелые сорта.

Таким образом, исследование в разностях позволило улучшить качество регрессионных уравнений на фоне линейных трендов и выявить общие закономерности динамики хозяйственно ценных признаков ряда культур, а также построить климатически обусловленные прогнозы.

Литература

1. Гордеев А. В и др. Биоклиматический потенциал России: меры адаптации в условиях изменяющегося климата / Под ред. А. В. Гордеева. М., 2008. 207 с.
2. Елисеева И. И., Курышева С. В., Костеева Т. В. и др. Эконометрика / Под ред. И. И. Елисеевой. М.: Финансы и статистика, 2007. 576 с.
3. Николаев М. В. Современный климат и изменчивость урожаев. СПб.: Гидрометеоздат, 1994. 201 с.
4. Новикова Л. Ю., Дюбин В. Н., Лоскутов И. Г., Зуев Е. В., Ковалева О. Н., Пороховинова Е. А., Сеферова И. В., Булынецов С. В., Артемьева А. М., Киру С. Д., Рогозина Е. В., Наумова Л. Г. Анализ динамики хозяйственно ценных признаков сортов сельскохозяйственных культур в условиях изменения климата // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. СПб.: ВИР, 2013. Т. 173. С. 102 - 119.
5. Руководство по агрометеорологическим прогнозам. Л.: Гидрометеоздат, 1984. Т. 1, 2.
6. Сиротенко О.Д., Клещенко А.Д., Павлова В.Н., Абашина Е.В., Семендяев А.К. Мониторинг изменений климата и оценка последствий глобального потепления для сельского хозяйства // Агрофизика. 2011. Вып. 3. С. 31–39.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОЗИОННОЙ ДЕГРАДАЦИИ ЛАНДШАФТОВ

¹А. С. Рулев, В. Г. Юферев, ²М. В. Юферев

¹ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский
агролесомелиоративный институт»,
²ОАО «Ростелеком»

Моделирование ландшафтов как совокупности определенных свойств рельефа, почв, растительности, литологии, а также климатических условий является необходимым для создания модели их эрозионной деградации и обусловлено тесной связью между параметрами ландшафта и процессами, протекающими в них.

Геоморфологическое моделирование ландшафтов является основой для выявления существующего эрозионного рельефа, так как оно отражает уже сложившуюся в течение определенного времени обстановку, а также при выявлении устойчивых зависимостей дает возможность прогноза эрозионного состояния таких ландшафтов [1]. В связи с этим представляет интерес определение при помощи математических методов характеристик эрозионных процессов на склонах [2].

Методика построения математической модели основана на исследованиях [3], в которых выдвинуты и обоснованы теоретические и методологические