

Научная статья/Research Article

УДК 633.34:581.543(571.63)

DOI: 10.36718/1819-4036-2025-7-74-85

Любовь Юрьевна Новикова^{1✉}, Ирина Владимировна Сеферова²,^{1,2}ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия¹l.novikova@vir.nw.ru²i.seferova@vir.nw.ru**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДАТ НАСТУПЛЕНИЯ ФЕНОФАЗ СОИ В ПРИМОРСКОМ КРАЕ
В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА**

Цель исследования – моделирование и прогнозирование динамики развития сои в Приморском крае в условиях изменения климата. Материалом для исследования послужили фенологические наблюдения в 1990–2021 гг. за тремя сортами сои (Приморская 529, Ходсон и Венера) на Дальневосточной опытной станции – филиале ВИР. Изучены даты начала и полных всходов, начала и полного цветения, начала и полного созревания. Исследована зависимость наступления этих фенофаз от месячных температур, суммы осадков и дат перехода температур выше 10, 11, ..., 19, 20 °C. В 1990–2021 гг. наблюдался рост летних температур при сохранении уровня осадков и тенденция к более раннему созреванию всех трех сортов сои на 0,16–0,18 сут/год. Регрессионный анализ показал, что даты начала цветения, начала и полного созревания сои в условиях дефицита теплообеспеченности Приморского края более чем на 50 % регулировались температурой. Выявлена сильная зависимость даты начала цветения «среднего сорта» сои от даты перехода температуры выше 18 °C (D_{18}), $r = 0,82$. Можно предположить, что это температурный минимум цветения адаптированных к условиям Приморского края сортов. Темп развития растений сои после цветения определялся в значительной степени эндогенными факторами, что показали сильные корреляции даты начала созревания с датой начала цветения ($r = 0,82$) и полного созревания с началом созревания ($r = 0,79$). Даты начала и полного созревания также коррелировали с датами перехода выше 17–18 °C ($r = 0,69–0,72$) у всех сортов. Более ранний переход температуры выше 18 °C на 1 сут вызывает ускорение цветения в среднем на 0,4 сут и ускорение созревания на 0,2 сут. При сохранении наблюдающихся трендов агроклиматических показателей можно прогнозировать продолжение смещения цветения и созревания сои на более ранние сроки со скоростью 0,1 сут/год, или 1 сут/10 лет.

Ключевые слова: соя, Приморский край, фенофазы, даты перехода температуры выше 18 °C, регрессионная модель, изменения климата, прогноз дат наступления фенофаз

Для цитирования: Новикова Л.Ю., Сеферова И.В. Прогнозирование дат наступления фенофаз сои в Приморском крае в условиях изменения климата // Вестник КрасГАУ. 2025. № 7. С. 74–85. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-7-74-85.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту FGEM-2022-0002 «Выявление возможностей генофонда бобовых культур для оптимизации их селекции и диверсификации использования в различных отраслях народного хозяйства».

Lyubov Yuryevna Novikova^{1✉}, Irina Vladimirovna Seferova²^{1,2}Federal Research Center All-Russian Institute of Plant Genetic Resources named after N.I. Vavilov, Saint Petersburg, Russia¹l.novikova@vir.nw.ru²i.seferova@vir.nw.ru

FORECASTING THE SOYBEAN PHENOPHASES ONSET DATES
IN THE PRIMORSKY REGION UNDER CLIMATE CHANGE

The objective of the study is to model and forecast the dynamics of soybean development in the Primorsky Region under climate change conditions. The material for the study was phenological observations in 1990–2021 for three soybean varieties (Primorskaya 529, Hodson, and Venera) at the Far Eastern Experimental Station, a branch of VIR. The dates of the beginning and full germination, beginning and full flowering, beginning and full ripening were studied. The dependence of the onset of these phenophases on monthly temperatures, precipitation amounts, and dates of temperature transition above 10, 11, ..., 19, 20 °C was studied. In 1990–2021, an increase in summer temperatures was observed while the precipitation level remained the same and there was a tendency for all three soybean varieties to ripen earlier by 0.16–0.18 days/year. Regression analysis showed that the dates of the beginning of flowering, the beginning and full ripening of soybeans in the conditions of heat supply deficit in the Primorsky Region were more than 50 % regulated by temperature. A strong dependence of the beginning date of flowering of the "medium variety" of soybeans on the date of transition of temperature above 18 °C (D_{18}), $r = 0.82$, was revealed. It can be assumed that this is the minimum temperature for flowering of varieties adapted to the conditions of the Primorsky Region. The rate of development of soybean plants after flowering was determined to a large extent by endogenous factors, as shown by strong correlations between the date of the onset of ripening and the date of the onset of flowering ($r = 0.82$) and full ripening and the onset of ripening ($r = 0.79$). The dates of the onset and full ripening also correlated with the dates of the transition above 17–18 °C ($r = 0.69$ – 0.72) for all varieties. An earlier transition of temperature above 18 °C by 1 day causes an acceleration of flowering by an average of 0.4 days and an acceleration of ripening by 0.2 days. If the observed trends in agroclimatic indicators are maintained, it is possible to predict a continuation of the shift in soybean flowering and ripening to earlier dates at a rate of 0.1 days/year, or 1 day/10 years.

Keywords: soybeans, Primorsky Region, phenophases, dates of temperature transition above 18 °C, regression model, climate change, forecast of dates of onset of phenophases

For citation: Novikova LYu, Seferova IV. Forecasting the soybean phenophases onset dates in the Primorsky Region under climate change. *Bulletin of KSAU*. 2025;(7):74-85. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-7-74-85.

Financing: the work was carried out within the framework of the state assignment in accordance with the thematic plan of VIR for the project FGEM-2022-0002 "Identification of the potential of the gene pool of legumes to optimize their selection and diversify their use in various sectors of the national economy".

Введение. Изменение климата стало существенным фактором, влияющим на мировое производство сои (*Glycine Glycine max* (L.) Merr.): потепление последних десятилетий избыточно и некомфортно для культуры в большинстве соепроизводящих стран [1–5], а для ряда регионов лимитирующим фактором является недостаток осадков [6, 7].

В России исторически традиционной зоной возделывания сои является Дальневосточный регион с муссонным климатом, близкий к Северо-Восточному Китаю – исходному ареалу сои [4, 8]. В XX в. соя стала широко возделываться в умеренно континентальном климате европейской территории России. Лимитирующим фактором урожайности сои на юге европейской части России является дефицит осадков [9], а на Дальнем Востоке – дефицит тепла [7, 10]. С начала XXI в. интерес к сое в России резко вырос

из-за ее высокой рентабельности [11, 12]. Потепление увеличило возможности для активного развития соеводства в России [11, 13].

Успехи селекции создали линейку ранних и сверхранних сортов, отличающихся параметрами климатической ниши, ранние образцы имеют более низкий температурный минимум всходов (7 °C) и цветения (15 °C), в то время как у более поздних эти значения могут достигать 11 и 17 °C соответственно [14, 15]. Современные сорта обладают пониженной фотопериодической чувствительностью для продвижения в более северные регионы.

Изменения климата усилили интерес к оценкам температурных требований сортов, в частности температурных минимумов фенофаз [16–18]. Температурным минимумом активной вегетации сои считается 10 °C, цветения – 15–18 °C, плодоношения – 12–10 °C; оптимумом –

диапазон 18–26 °C [8, 10, 19–21]. Развитие ускоряется с ростом температуры до 28–32 °C [5, 22, 23], однако у сортов северного экотипа предельная скорость развития достигается при 19 °C [24]. Большинство сортов сои значительно ускоряют развитие при сокращении длины дня [10, 25, 26]. При кратковременных засухах продолжительность вегетации сокращается, при длительных – возрастает [9, 27].

В условиях изменения климата смещаются как даты фенофаз, начиная с посева, так и сочетания лимитирующих факторов, что делает перспективным использование в качестве предикторов обобщенных факторов, не привязанных к конкретным месяцам. Показано, что у культур умеренного пояса – зерновых, зернобобовых, картофеля, капусты, винограда – фенодаты зависят от характеристик периодов с температурами выше 10 и 15 °C [14, 28, 29].

В частности для сои на Северном Кавказе показано [14, 29], что продолжительность вегетации зависит положительно от гидротермического коэффициента (ГТК) за период с температурами выше 15 °C и от продолжительности периода с температурами 15–10 °C осенью. Содержание белка в семенах сои увеличивалось в годы с большей суммой температур выше 22 °C и с меньшими осадками за период с температурами выше 18 °C, а содержание масла – от ГТК за период с температурами выше 19 °C и продолжительности осеннего периода с температурами 15–10 °C [30]. Для условий Дальнего Востока показано, что урожайность растет с ростом суммы температур выше 10 °C, но снижается избыточными осадками октября [7].

Понимание связи между фенофазами и факторами окружающей среды имеет важное значение для выяснения стратегии адаптации к флуктуациям климата [31]. Фенология сои моделируется разными способами: суммированием температур выше минимума фенофазы [9, 19, 24, 29, 32, 33], динамическими моделями разной степени детализации стадий развития и влияющих факторов – температуры, фотопериода, осадков [27, 34, 35].

Цель исследования – моделирование и прогнозирование динамики развития сои в Приморском крае в условиях изменения климата.

Объекты и методы. Использованы наблюдения 1990–2021 гг. за фенологией трех сортов сои на Дальневосточной опытной станции – филиале ВИР (ДВОС, г. Владивосток): Приморская

529 (к-4389, Россия, Приморский НИИСХ, в Госреестре с 1949 по 2008 г. по Дальневосточному региону; Ходсон (Канада, к-7135, в Госреестре с 1984 г. по Северо-Кавказскому и Дальневосточному регионам); Венера (к-7388, Россия, ФГБНУ «ФНЦ агробιοтехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки», в Госреестре с 1987 г. по Дальневосточному региону).

Изучены даты посева, начала (10 % растений) и полного вступления (75 %) в фенофазы: всходы, цветение, созревание и продолжительность вегетационного периода. Имеются пропуски: нет данных 2000, 2001, 2015, 2016, 2018 и 2020 гг., т. е. изучены 26 лет. Много пропусков в датах цветения, у сортов представлены по 9–13 лет.

В программе VTS [36] по суточным метеоданным рассчитаны ежегодные даты перехода температур через определенные пределы (10, 11, ..., 19, 20 °C) и показатели тепло- и влагообеспеченности периодов между ними.

Исследование скорости реакции культуры на изменение погоды при наличии данных нескольких синхронно наблюдаемых сортов можно проводить с помощью модели «среднего сорта», т. е. усредненных за год показателей нескольких сортов. «Средний сорт» показывает более сильную зависимость от агрометеорологических показателей, чем отдельные сорта, так как сорта здесь выступают как повторности [14, 37].

Статистическая обработка (расчет трендов и разностей временных рядов, дисперсионный, корреляционный, регрессионный анализ) выполнена в программе Statistica 13.3. Регрессионные модели построены методом последовательного включения переменных, при котором из множества предикторов в модель последовательно встраиваются наиболее значимые до исчерпания значимых предикторов [38]. В исследовании принят уровень значимости 5 %, если не указано иное.

Климат Приморского края – муссонный, с максимумом осадков в середине лета; почвы опытной станции – лугово-бурые, тяжелосуглинистые. Использованы метеоданные сайта ВНИИГМИ-Мировой центр данных (meteo.ru) для станции Владивосток (WMO ID = 31960), находящейся на расстоянии 18 км от пункта исследования.

Результаты и их обсуждение. В 1990–2021 гг. сумма активных температур выше 10 °C увеличивалась на 7,6 °C/год (уровень значимости тренда $p = 0,002$) (рис. 1 а) за счет более

раннего перехода температур выше 10 °C (на 0,25 сут/год, $p = 0,034$), увеличения продолжительности периода с температурами выше 10 °C (на 0,28 сут/год, $p = 0,048$), роста средней температуры выше 10 °C (на 0,02 °C/год, $p = 0,026$). Повышалась температура всех месяцев вегетации сои (май – октябрь), достоверно – августа (на 0,04 °C/год, $p = 0,023$) и сентября (на 0,03 °C/год, $p = 0,008$), значимо на 10 %-м уровне – мая (на 0,03 °C/год, $p = 0,097$) и июля (на 0,04 °C/год, $p = 0,060$).

В умеренном климате Владивостока даты устойчивого перехода наблюдались ежегодно для температуры ниже 18 °C. Даты устойчивого перехода через 18 и 19 °C наблюдались в 1990–2021 гг. 30 лет, выше 20 °C – 18 лет. Даты перехода температур выше 10, 11, ... 18, 19, 20 °C смещались на более ранние сроки со скоростью 0,1–1,0 сут/год (не все тренды достоверны, $0,022 < p < 0,312$). Сумма осадков за период с температурой выше 10 °C и ГТК снижались, но недостоверно ($p > 0,442$; рис. 1, в, г), тренды месячных осадков были разнонаправлены.

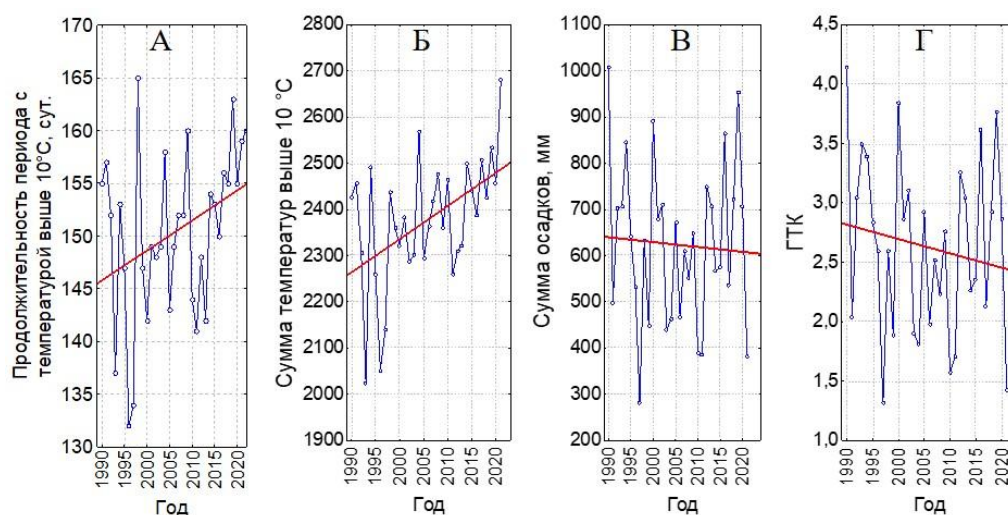


Рис. 1. Динамика характеристик периода с температурами выше 10 °C на Дальневосточной опытной станции в 1990–2021 гг.: А – продолжительность периода с температурами выше 10 °C; Б – сумма температур; В – сумма осадков; Г – ГТК

Dynamics of characteristics of the period with temperatures above 10 °C at the Far East Experiment Station in 1990–2021: А – duration of the period with temperatures above 10 °C; Б – sum of temperatures; В – sum of precipitation; Г – HTC

В среднем за период наблюдений посев производился 31 мая (рис. 2). Начало всходов наблюдалось 12–13 июня, различия сортов недостоверны ($p = 0,596$). Начало цветения сорта Приморская 529 было 24 июля, сортов Ходсон и Венера – 21 июля, различия недостоверны ($p = 0,260$), даты полного цветения (31, 27 и 26 июня соответственно) различались достоверно ($p = 0,044$). Сорт Приморская 529 характеризовался достоверно ($p = 0,001$) более поздним началом созревания (30 сентября), чем Ходсон и Венера (26 и 25 сентября), на 5 сут более поздним полным созреванием (13 октября), чем Ходсон и Венера (8 октября у обоих, $p = 0,000$) и на 5 сут большей продолжительностью вегетации (122 сут против 117 сут, $p = 0,000$). Таким образом, динамика развития сортов до начала цветения достоверно не различалась, а даты начала и полного созревания различались на 5 сут.

В 1990–2021 гг. дата посева тренда не имела ($p > 0,586$). У всех сортов наблюдались тенденции к более раннему началу всходов (недостоверная, $p > 0,163$; см. рис. 2), полным всходам (на 0,17 сут/год; $p < 0,043$), началу созревания (на 0,05–0,12 сут/год, недостоверная, $p > 0,212$) и полному созреванию (на 0,16–0,18 сут/год, $p < 0,065$). Начало и полное цветение имели разнонаправленные недостоверные тренды ($p > 0,447$). У всех сортов сокращалась продолжительность «посев–всходы» на 0,05–0,10 сут/год ($p < 0,055$) и «посев–полное созревание» на 0,12–0,23 сут/год ($p < 0,086$). Продолжительность периода «всходы – полное созревание» достоверных трендов ни у одного сорта не имела ($p > 0,789$). Таким образом, сорта показали одинаковую динамику фенодат за исследованный период.

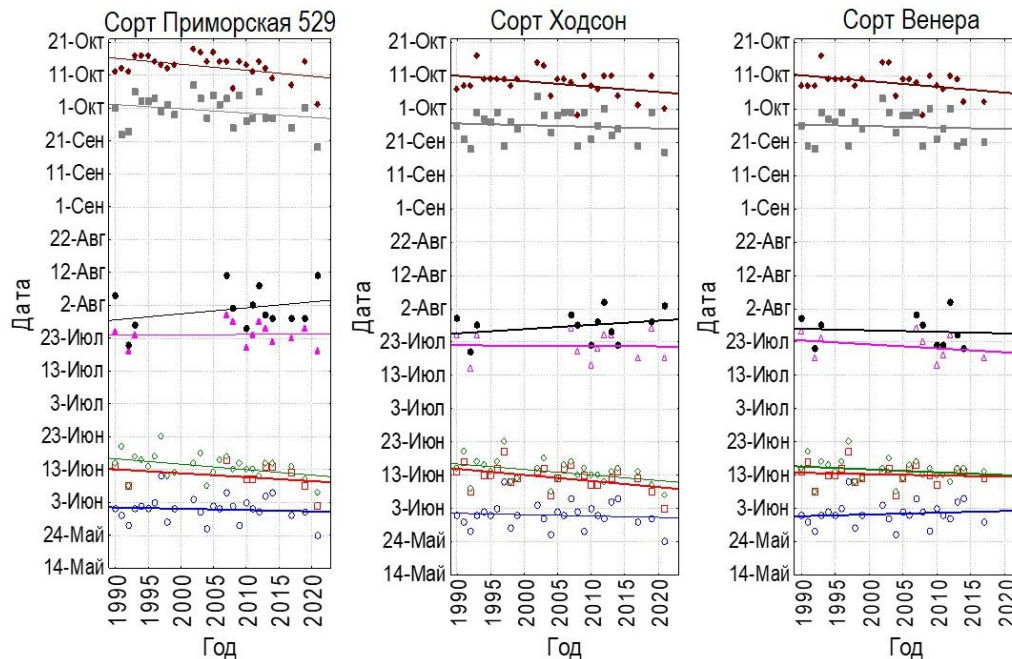


Рис. 2. Динамика наступления дат фенофаз у сортов сои на Дальневосточной опытной станции в 1990–2021 гг.

Обозначения дат фенофаз: посев; начало всходов; полные всходы; начало цветения; полное цветение; начало созревания; полное созревание

Dynamics of the onset of phenophase dates in soybean varieties at the Far East Experiment Station in 1990–2021.

Phenophase date designations: sowing; beginning of emergence; full emergence; beginning of flowering; full flowering; beginning of maturity; full maturity

Поскольку фенология трех сортов близка, были рассмотрены модели фенодат «среднего сорта». Такие модели дают более устойчивые решения, уменьшая случайную ошибку показателей отдельных сортов. Модели строились с использованием агрометеорологических предикторов: средних месячных температур и суммы осадков, дат перехода температур выше и ниже 10, 11, ..., 19, 20 °С, характеристик периодов с температурами выше 10, 15, 20 °С. При включении в качестве предикторов дат предыдущих фенофаз модели большинства фенодат показали зависимость только от одного предиктора – предыдущей фенодаты. Исключением стали даты начала и полного цветения. У «среднего сорта» начало всходов определялось датой посева ($r = 0,78$), полные всходы – датой начала всходов ($r = 0,90$), начало созревания – началом цветения ($r = 0,82$), полное созревание – началом созревания ($r = 0,79$). Дата начала цветения проявила зависимость от даты перехода температуры выше 18 °С ($r = 0,82$). Из исследованных фенодат начало цветения коррелировало с датой посева ($r = 0,56$, достоверна

на 10 %-м уровне значимости, $p = 0,072$), а дата полного цветения не имела достоверных корреляций с другими фенодатами даже на 10 %-м уровне значимости.

Для моделирования и прогнозирования агрометеорологической реакции сои были построены модели фенодат «среднего сорта» без использования предыдущих фенодат. Даты выражены в номере дня от начала года.

Дата посева (D_n) была раньше в годы с более ранней датой устойчивого перехода температур выше 10 °С (D_{10}) и позже в годы с высокими осадками мая ($P_{май}$):

$$D_n = 116,043 + 0,244D_{10} + 0,030P_{май}, \quad R^2 = 0,36. \quad (1)$$

Дата начала всходов ($D_{НВ}$) имела несильную зависимость от даты перехода температур выше 10 °С:

$$D_{НВ} = 130,132 + 0,253D_{10}, \quad R^2 = 0,23. \quad (2)$$

Для дат полных всходов и полного цветения не получилось значимых агрометеорологических моделей.

Дата начала цветения ($D_{НЦ}$) определялась датой перехода температур выше 18°C (D_{18}):

$$D_{НЦ} = 130,186 + 0,378D_{18}, \quad R^2 = 0,67. \quad (3)$$

Даты начала созревания ($D_{НС}$) и полного созревания ($D_{ПС}$) на 50 % и более определялись температурой июля ($T_{июль}$):

$$D_{НС} = 318,925 - 2,668T_{июль}, \quad R^2 = 0,57. \quad (4)$$

$$D_{ПС} = 322,069 - 2,119T_{июль}, \quad R^2 = 0,50. \quad (5)$$

Зависимость $D_{НЦ}$ от $T_{июль}$ также была сильной:

$$D_{НЦ} = 239,239 - 1,932T_{июль}, \quad R^2 = 0,54. \quad (6)$$

Т. е. температура июля более чем на 50 % детерминирует даты начала цветения, начала и полного созревания. Температура июля в годы исследования имела тренд $0,04^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ($p = 0,060$), что позволяет прогнозировать скорость сдвига дат цветения, начала и полного созревания на $0,08$, $0,11$ и $0,08$ сут/год соответственно по моделям (4)–(6).

Показатели, связанные с ходом температурной кривой, такие как даты перехода температур выше определенных пределов, имеют преимущества перед календарными показателями, такими как месячные характеристики, когда фенодаты показывают устойчивые тенденции к смещению на другие календарные сроки. Кроме того, связь с датой перехода температуры выше определенного предела может быть интерпретирована как физиологическая зависимость от температурного минимума начала цветения. Модели зависимости дат начала и полного созревания от D_{18} на 5 % менее точны по сравнению с (4) и (5):

$$D_{НС} = 212,745 + 0,291D_{18}, \quad R^2 = 0,52. \quad (7)$$

$$D_{ПС} = 239,227 + 0,222D_{18}, \quad R^2 = 0,45. \quad (8)$$

В годы исследования D_{18} сдвигалась на более ранние сроки со скоростью $0,33$ сут/год ($p = 0,088$), т. е. в случае продолжения этой тенденции можно прогнозировать сдвиг дат начала цветения, начала и полного созревания на более ранние даты со скоростью $0,12$ сут/год и на $0,10$ и $0,07$ сут/год по (3), (7) и (8). Т. е. по разным моделям скорость сдвига фенодат на более ранние сроки – около $0,1$ сут/год.

Предполагая, что корреляция с датами перехода температур выше определенных пределов имеет физиологический смысл, для выявления возможных особенностей индивидуальной реакции сортов были рассмотрены корреляции фенодат и дат перехода температур выше определенных пределов всех трех сортов (табл.). Дата начала цветения была наиболее термочувствительной у всех сортов: у сорта Приморская 529 максимальный коэффициент корреляции составил $r = 0,73$ с датой перехода выше 20°C , у Ходсон и Венера – с D_{18} $r = 0,78$ и $r = 0,80$. Зависимость от более высокой температуры у более позднего сорта Приморская 529 может быть объяснена как более высоким температурным минимумом цветения, так и смещением из-за уменьшения выборки за счет выбывания холодных лет, когда переход выше 20°C не наблюдался. Даты начала и полного созревания имели максимальные коэффициенты корреляции с датами перехода выше 17 – 18°C , $r = 0,62$ – $0,72$.

Корреляция дат наступления фенофаз сортов сои с датами перехода температуры выше определенных пределов на Дальневосточной опытной станции (1990–2021 гг.)
Correlation of phenophase onset dates of soybean varieties and dates of temperature transition above certain limits at the Far East Experiment Station (1990–2021)

Фенодата	Температурный предел										
	10 °C	11 °C	12 °C	13 °C	14 °C	15 °C	16 °C	17 °C	18 °C	19 °C	20 °C
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Сорт Приморская 529											
Начало всходов	0,59*	0,51*	0,26	–0,11	–0,16	–0,20	–0,05	0,15	0,27	0,35	0,28
Начало цветения	0,20	0,15	0,10	0,16	0,20	0,21	0,44	0,51	0,64*	0,64*	0,73*
Начало созревания	0,23	0,24	0,34	0,41*	0,42*	0,47*	0,65*	0,69*	0,65*	0,53*	0,62*
Полное созревание	0,23	0,22	0,24	0,24	0,21	0,23	0,47*	0,55*	0,62*	0,49*	0,51

Окончание табл.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Сорт Ходсон											
Начало всходов	0,49*	0,43*	0,33	0,11	0,07	0,05	0,20	0,26	0,26	0,12	0,20
Начало цветения	0,15	0,14	0,12	0,32	0,38	0,44	0,67*	0,74*	0,78*	0,76*	0,65
Начало созревания	0,08	0,08	0,17	0,28	0,32	0,41*	0,62*	0,70*	0,72*	0,62*	0,68*
Полное созревание	0,26	0,28	0,35	0,38	0,37	0,40*	0,63*	0,69*	0,65*	0,54*	0,57*
Сорт Венера											
Начало всходов	0,39	0,29	0,16	0,01	0,01	0,00	0,14	0,18	0,17	0,04	-0,01
Начало цветения	0,10	0,22	0,16	0,13	0,21	0,28	0,58	0,69*	0,80*	0,72*	0,73
Начало созревания	0,05	0,07	0,18	0,25	0,31	0,40	0,64*	0,70*	0,69*	0,58*	0,62*
Полное созревание	0,24	0,27	0,34	0,32	0,32	0,36	0,63*	0,68*	0,63*	0,53*	0,54
«Средний сорт»											
Начало всходов	0,49*	0,42*	0,33	0,11	0,08	0,06	0,20	0,27	0,26	0,12	0,20
Начало цветения	0,07	0,08	0,07	0,26	0,32	0,38	0,64*	0,72*	0,82*	0,81*	0,76*
Начало созревания	0,12	0,13	0,23	0,35	0,38	0,46*	0,67*	0,72*	0,72*	0,59*	0,66*
Полное созревание	0,25	0,25	0,31	0,35	0,34	0,37	0,61*	0,68*	0,67*	0,54*	0,56*

Примечание. (*) – отмечены достоверные на 5 %-м уровне значимости коэффициенты.

Скорости реакции даты начала цветения на изменения D_{18} составили у сортов Приморская 529, Ходсон, Венера (см. рис. 2) 0,29, 0,41, 0,49 сут/сут соответственно; начала созревания – 0,27, 0,29, 0,29 сут/сут; полного созревания – 0,21, 0,22, 0,21.

Таким образом, несмотря на небольшие различия в продолжительности вегетации, в датах начала и полного созревания, изученные сорта реагировали на изменение D_{18} с примерно одинаковой скоростью – 0,3 и 0,2 сут/сут соответственно. Скорости реакции даты начала цветения на D_{18} варьировали от 0,3 до 0,5 сут/сут.

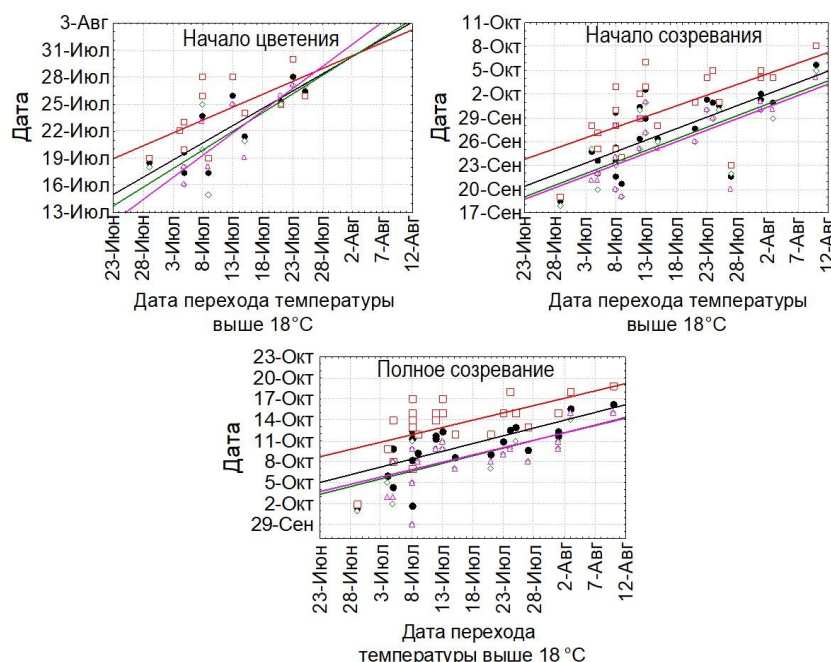


Рис.3. Зависимость дат наступления фенофаз от даты перехода температуры выше 18 °С на Дальневосточной опытной станции (1990–2021 гг.)

Обозначения сортов: Приморская 529; Ходсон; Венера; "средний сорт"

The dependence of phenophases onset dates on the date of temperature transition above 18°C at the Far Eastern Experiment Station (1990–2021)

Designations of varieties: Primorskaya 529; Hodgson; Venera; "medium variety"

Регрессионный анализ показал, что посев сои в Приморье происходил раньше в годы с более ранним переходом температуры выше 10°C . В последний год наблюдений – 2021 г. посев был осуществлен в самый ранний за все годы исследования срок 24 мая, что может быть началом адаптации к климатическим реалиям. Смещение даты перехода температуры выше 10°C весной на более ранние даты открывает возможности использования дополнительных ресурсов тепла при его дефиците для сои в Приморском крае. Известна тенденция к запаздыванию адаптации агротехники и меньшей скорости реакции фенологии агроценозов по сравнению с природными сообществами [39].

Дата начала цветения показала минимальную зависимость от сроков посева и наступления предыдущих фенофаз (начала и полных всходов) и максимальную – от хода температурной кривой. Температура $17\text{--}18^{\circ}\text{C}$ может быть интерпретирована как физиологический минимум для цветения сортов сои, адаптированных к условиям Приморья. Это немного отличается от данных, полученных ранее методом динамического моделирования: было показано, что у раннеспелых образцов сои в условиях Ленинградской области температурный минимум цветения $15\text{--}17^{\circ}\text{C}$ [30].

Темп развития растений сои во все исследованные межфазные периоды, кроме всходы – цветение, определялся в значительной степени эндогенными факторами, как показывают сильные корреляции фенодат с предыдущими. Ключевой точкой воздействия на динамику развития сои является дата начала цветения. Известно, что именно даты начала вегетации наиболее подвержены погодным воздействиям по сравнению с летними в естественных растительных сообществах [16, 31]. Зависимость дат начала и полного созревания от D_{18} опосредована сильной зависимостью даты начала созревания от даты начала цветения. У «среднего сорта» начало цветения наступает в среднем через 13 сут после перехода температур выше темпе-

ратурного предела 18°C , начало созревания – через 73 сут, полное созревание – через 86 сут. Наибольшая скорость реакции на смещение D_{18} на более ранние сроки у даты цветения, в среднем $0,4$ сут при смещении D_{18} на сутки, несколько меньше у даты начала созревания – $0,3$ сут/сут, еще меньше у даты полного созревания – $0,2$ сут/сут, т. е. влияние D_{18} на фенологические события ослабевает по мере удаления от этой даты.

Заключение. В 1990–2021 гг. наблюдалась тенденция к более раннему полному созреванию всех изученных в условиях Приморского края сортов сои – на $0,16\text{--}0,18$ сут/год.

Темп развития растений сои после цветения определялся в значительной степени эндогенными факторами, что показали сильные корреляции даты начала созревания с датой начала цветения и полного созревания с началом созревания.

Даты начала цветения, начала и полного созревания сои в условиях дефицита теплообеспеченности Приморского края более чем на 50 % регулировались температурой. Выявлена сильная зависимость даты начала цветения сои от даты перехода температуры выше 18°C . Можно предположить, что это температурный минимум цветения адаптированных к условиям Приморского края сортов. Более ранний переход температуры выше 18°C на 1 сут вызывает ускорение цветения в среднем на $0,4$ сут и ускорение созревания на $0,2$ сут.

При сохранении наблюдающихся трендов агроклиматических показателей можно прогнозировать продолжение смещения цветения и созревания сои на более ранние сроки со скоростью $0,1$ сут/год, или 1 сут/10 лет. Продолжительность периода «посев – полное созревание» сокращалась на $0,12\text{--}0,23$ сут/год, а продолжительность вегетационного периода достоверных трендов не имела.

Диапазон температурных минимумов сои может быть расширен при увеличении выборки сортов.

Список источников

1. Lobell D.B., Asner G.P. Climate and management contributions to recent trends in US agricultural yields // Science. 2003. Vol. 299, № 5609. P. 1032. DOI: 10.1126/science.10784.
2. Wenjiao S., Fulu T., Zhao Z. A review on statistical models for identifying climate contributions to crop yields // J. Geogr. Sci. 2013. Vol. 23, № 3. P. 567–576. DOI: 10.1007/s11442-013-1029-3.

3. Zhao C., Liu B., Piao S., et al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates // *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2017. Vol. 114, № 35. P. 9326–9331. DOI: 10.1073/pnas.1701762114.
4. Bandillo N.B., Anderson J.E., Kantar M.B., et al. Dissecting the genetic basis of local adaptation in soybean // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7, № 1. P. 17195. DOI: 10.1038/s41598-017-17342-w.
5. Kim Y.U., Choi D.H., Ban H.Y., et al. Temporal patterns of flowering and pod set of determinate soybean in response to high temperature // *Agronomy*. 2020. Vol. 10, № 3. P. 414. DOI: 10.3390/agronomy10030414.
6. Calvino P.A., Sadras V.O. Interannual variation in soybean yield: interaction among rainfall, soil depth and crop management // *Field Crop. Res.* 1999. Vol. 63, № 3. P. 237–246.
7. Novikova L.Yu., Bulakh P.P., Nekrasov A.Yu., et al. Soybean Response to Weather and Climate Conditions in the Krasnodar and Primorye Territories of Russia over the Past Decades // *Agronomy*. 2020. Vol. 10, № 9. P. 1278. DOI: 10.3390/agronomy10091278.
8. Золотницкий В.А. Соя на Дальнем Востоке. Хабаровск: Хабаровское книжное издательство, 1962.
9. Степанова В.М. Климат и сорт: соя. Ленинград: Гидрометеиздат, 1985.
10. Енкен В.Б. Соя. М.: СельхозГИЗ, 1959.
11. Зеленцов С.В., Мошненко Е.В. Пути адаптации сельского хозяйства России к глобальным изменениям климата на примере экологической селекции сои // *Научный диалог*. 2012. № 7. С. 40–59.
12. Зайцев Н.И., Бочкарев Н.И., Зеленцов С.В. Перспективы и направления селекции сои в России в условиях реализации национальной стратегии импортозамещения // *Масличные культуры. Научно-технический бюллетень ВНИИМК*. 2016. № 2. С. 3–11.
13. Федорова З.С., Демьяненко Е.В., Малахова С.Д. Продуктивность сортов сои в зависимости от метеорологических условий. В сб.: XIV научно-практическая конференция с международным участием «Научные основы устойчивого развития сельскохозяйственного производства в современных условиях». Калуга, 2021. С. 112–115.
14. Новикова Л.Ю., Дюбин В.Н., Лоскутов И.Г., и др. Анализ динамики хозяйственно ценных признаков сортов сельскохозяйственных культур в условиях изменения климата // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2013. Т. 173. С. 102–119.
15. Novikova L.Yu., Seferova I.V., Kozlov K.N. Model Parameterization: The Timing of Flowering in Soybean Accessions // *Biophysics*. 2018. Т. 63, № 6. P. 956–958. DOI: 10.1134/S0006350918060210.
16. Шульц Г.Э. Общая фенология. Л., 1981.
17. Steinmaus S.J., Prather T.S., Holt S. Estimation of base temperatures for nine weed species // *Journal of Experimental Botany*. 2000. Vol. 51, № 343. P. 275–286. DOI: 10.1093/jexbot/51.343.275.
18. Сиротенко О.Д., Грингоф И.Г. Оценки влияния ожидаемых изменений климата на сельское хозяйство Российской Федерации // *Метеорология и гидрология*. 2006. № 8. С. 92–101.
19. Белолюбцев А.И., Сенников В.А. Биоклиматический потенциал агроэкосистем: учебное пособие. М.: Издательство РГАУ-МСХА, 2012.
20. Choi D.H., Ban H.Y., Seo B.S., et al. Phenology and Seed Yield Performance of Determinate Soybean Cultivars Grown at Elevated Temperatures in a Temperate Region // *PLoS ONE*. 2016. Vol. 11, № 11. P. e0165977. DOI: 10.1371/journal.pone.0165977.
21. Staniak M., Czopek K., Stępień-Warda A., et al. Cold Stress during Flowering Alters Plant Structure, Yield and Seed Quality of Different Soybean Genotypes // *Agronomy*. 2021. Vol. 11, № 10. P. 2059. DOI: 10.3390/agronomy11102059.
22. Allen L.H., Zhang L., Boote K.J., et al. Elevated temperature intensity, timing, and duration of exposure affect soybean internode elongation, mainstem node number, and pod number per plant // *Crop J.* 2018. Vol. 6, № 2. P. 148–161. DOI: 10.1016/j.cj.2017.10.005.
23. Alsajri F.A., Wijewardana C., Irby J.T., et al. Developing functional relationships between temperature and soybean yield and seed quality // *Agronomy Journal*. 2020. Vol. 112, № 1. P. 194–204. DOI: 10.1002/agj2.20034.

24. Сеферова И.В., Новикова Л.Ю. Климатические факторы, влияющие на развитие скороспелых образцов сои в условиях северо-запада РФ // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2015. Т. 176, № 1. С. 88–97.
25. Федорина Я.В., Хлесткина Е.К., Сеферова И.В., и др. Молекулярно-генетические механизмы, лежащие в основе продвижения ареала возделывания сои к северу // Экологическая генетика. 2022. Т. 20, № 1. С. 13–30. DOI: 10.17816/ecogen83879
26. Li-xin Z., Wei L., Tsegaw M., et al. Principles and practices of the photo-thermal adaptability improvement in soybean // Journal of Integrative Agriculture. 2020. Vol. 19, № 2. P. 295–310. DOI: 10.1016/S2095-3119(19)62850-9.
27. Hodges T., French V. Soybean: soybean stages modeled from temperature, daylength and water availability // Agron. J. 1985. Vol. 77, № 3. P. 500–505. DOI: 10.2134/agronj1985.00021962007700030031x.
28. Мельник Ю.С., Гулинова Н.В., Бедарев С.А., ред. Руководство по агрометеорологическим прогнозам. Т. 2. Технические, овощные, плодовые, субтропические культуры, травы, пастбищная растительность, отгонное животноводство. Ленинград: Гидрометеиздат, 1984.
29. Сеферова И.В., Новикова Л.Ю., Некрасов А.Ю. Оценка реакции сои сорта Комсомолка на изменения климата в Краснодарском крае // Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2011. № 1 (146-147). С. 72–77.
30. Новикова Л.Ю., Сеферова И.В., Некрасов А.Ю., и др. Влияние погодно-климатических условий на содержание белка и масла в семенах сои на Северном Кавказе // Вавиловский журнал генетики и селекции, 2018. Т. 22, № 6. С. 708–715. DOI: 10.18699/VJ18.414.
31. Kim A.R., Seol J., Lim B.S., et al. Response of Plant Phenology on Microclimate Change Depending on Land Use Intensity in Seoul, Central Korea // Forests. 2024. № 15. P. 718. DOI: 10.3390/f15040718.
32. Penalba O.C., Bettolli M.L., Vargas W.M. The impact of climate variability on soybean yields in Argentina. Multivariate regression // Meteor. Appl. 2007. № 14. P. 3–14.
33. Kozlov K.N., Novikova L.Yu., Seferova I.V., et al. A Mathematical Model of the Effect of Climatic Factors on Soybean Development // Biophysics. 2018. Vol. 63, № 1. P. 136–137. DOI: 10.1134/S0006350918010086.
34. Pedersen P., Boote K.J., Jones J.W., et al. Modifying the CROPGRO-Soybean Model to Improve Predictions for the Upper Midwest // Agron. J. 2004. Vol. 96, № 2. P. 556–564. DOI: 10.2134/agronj2004.5560.
35. Setiyono T.D., Weiss A., Specht J.E., et al. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions // Field Crops Research. 2007. Vol. 100, № 2-3. P. 257–271. DOI: 10.1016/j.fcr.2006.07.011.
36. Новикова Л.Ю., Лебедева Е.Г. Программа для прогнозирования реакции сортов винограда на изменения климата VITIS TIME SERIES. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019664805. 13.11.2019.
37. Лазаревский М.А. Роль тепла в жизни европейской виноградной лозы. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1961.
38. Халафян А.А. STATISTICA 6. Математическая статистика с элементами теории вероятностей. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010.
39. Menzel A., Sparks T.H., Estrella N., et al. European phenological response to climate change matches the warming pattern // Global Change Biology. 2006. Vol. 12, № 10. P. 1969–1976. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x

References

1. Lobell DB, Asner GP. Climate and management contributions to recent trends in US agricultural yields. *Science*. 2003;299(5609):1032. DOI: 10.1126/science.10784.
2. Wenjiao S, Fulu T, Zhao Z. A review on statistical models for identifying climate contributions to crop yields. *J. Geogr. Sci.* 2013;23(3):567-576. DOI: 10.1007/s11442-013-1029-3.
3. Zhao C, Liu B, Piao S, et al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2017;114(35):9326-9331. DOI: 10.1073/pnas.1701762114.

4. Bandillo NB, Anderson JE, Kantar MB, et al. Dissecting the genetic basis of local adaptation in soybean. *Scientific Reports*. 2017;7(1):17195. DOI: 10.1038/s41598-017-17342-w.
5. Kim YU, Choi DH, Ban HY, et al. Temporal patterns of flowering and pod set of determinate soybean in response to high temperature. *Agronomy*. 2020;10(3):3414. DOI: 10.3390/agronomy10030414.
6. Calvino PA, Sadras VO. Interannual variation in soybean yield: interaction among rainfall, soil depth and crop management. *Field Crop. Res.* 1999;63(3):237-246.
7. Novikova LYu, Bulakh PP, Nekrasov AYu, et al. Soybean Response to Weather and Climate Conditions in the Krasnodar and Primorye Territories of Russia over the Past Decades. *Agronomy*. 2020;10(9):1278. DOI: 10.3390/agronomy10091278.
8. Zolotnitskiy VA. *Soya na Dal'nem Vostoke*. Khabarovsk: Khabarovskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1962. (In Russ.).
9. Stepanova VM. *Klimat i sort: soya*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1985. (In Russ.).
10. Enken VB. *Soya*. Moscow: Sel'hozGIZ; 1959. (In Russ.).
11. Zelentsov SV, Moshnenko EV. Means of Russia's Agricultural Adaptation to Global Climate Changes by Example of Soybean Ecological Selection. *Nauchnyi Dialog*. 2012;7:40-59 (In Russ.).
12. Zaytsev NI, Bochkaryov NI, Zelentsov SV. Prospects and directions for soybean breeding in Russia under implementation conditions of the national strategy of import substitution. *Oil Crops. Scientific and Technical Bulletin of VNIIMK*. 2016;2:3-11. (In Russ.).
13. Fedorova ZS, Demyanenko EV., Malahova SD. Produktivnost' sortov soi v zavisimosti ot meteorologicheskikh uslovij. In: *XIV nauchno-prakticheskaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem «Nauchny'e osnovy' ustojchivogo razvitiya sel'skohozyajstvennogo proizvodstva v sovremenny'h usloviyah»*. Kaluga; 2021. P. 112–115. (In Russ.).
14. Novikova LYu, Dyubin VN, Loskutov IG, et al. Analysis of economical valuable characters of cereals cultivars under climate change conditions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. (In Russ.). 2013;173:102-119.
15. Novikova LYu, Seferova IV, Kozlov KN. Model Parameterization: The Timing of Flowering in Soybean Accessions. *Biophysics*. 2018;63:956-958. DOI: 10.1134/S0006350918060210.
16. Schultz GE. *Obshchaya fenologiya*. Leningrad, 1981. (In Russ.).
17. Steinmaus SJ, Prather TS, Holt S. Estimation of base temperatures for nine weed species. *Journal of Experimental Botany*. 2000; 51(343):275-286. DOI: 10.1093/jexbot/51.343.275.
18. Sirotenko OD, Gringof IG. Estimates of the influence of expected climate changes on Russian federation's agriculture. *Meteorology and Hydrology*. 2006;8:92-101. (In Russ.).
19. Belolyubtsev AI, Sennikov VA. *Bioklimaticheskij potencial agroekosistem: uchebnoe posobie*. Moscow: RGAU-MSHA Press, 2012. (In Russ.).
20. Choi DH, Ban HY, Seo BS, et al. Phenology and Seed Yield Performance of Determinate Soybean Cultivars Grown at Elevated Temperatures in a Temperate Region. *PLoS ONE*. 2016;11(11):e0165977. DOI: 10.1371/journal.pone.0165977.
21. Staniak M, Czopek K, Stępień-Warda A, et al. Cold Stress during Flowering Alters Plant Structure, Yield and Seed Quality of Different Soybean Genotypes. *Agronomy*. 2021;11(10):2059. DOI: 10.3390/agronomy11102059.
22. Allen LH, Zhang L, Boote KJ, et al. Elevated temperature intensity, timing, and duration of exposure affect soybean internode elongation, mainstem node number, and pod number per plant. *Crop J*. 2018;6(2):148-161. DOI: 10.1016/j.cj.2017.10.005.
23. Alsajri FA, Wijewardana C, Irby JT, et al. Developing functional relationships between temperature and soybean yield and seed quality. *Agronomy Journal*. 2020;112(1):194-204. DOI: 10.1002/agj2.20034.
24. Seferova IV, Novikova LYu. Climatic factors affecting the development of early soybean accessions in the environments of the Russian Northwest. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2015;176(1):88-97. (In Russ.).
25. Fedorina JaV, Khlestkina EK, Seferova IV, et al. Genetic mechanisms underlying the expansion of soybean *Glycine max* (L.) Merr. cultivation to the north. *Ecological genetics*. 2022;20(1):13-30. (In Russ.). DOI: 10.17816/ecogen83879.

26. Li-xin Z, Wei L, Tsegaw M, et al. Principles and practices of the photo-thermal adaptability improvement in soybean. *Journal of Integrative Agriculture*. 2020;19(2):295-310. DOI: 10.1016/S2095-3119(19)62850-9.
27. Hodges T, French V. Soybean: soybean stages modeled from temperature, daylength and water availability. *Agron. J.* 1985;77(3):500-505. DOI: 10.2134/agronj1985.00021962007700030031x.
28. Mel'nik YuS, Gulinova NV, Bedarev SA, editors. *Rukovodstvo po agrometeorologicheskim prognozam. Vol. 2. Tehnicheskie, ovoshhny'e, plodovy'e, subtropicheskie kul'tury, travy, pastbishhnaya rastitel'nost', otgonnoe zhivotnovodstvo*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984.
29. Seferova IV, Novikova LYu, Nekrasov AY. Estimation of soybean cultivar Komsomolka reaction on climate changes in Krasnodar Region. *Oil Crops. Scientific and Technical Bulletin of VNIIMK*. 2011;1(146-147):72-77. (In Russ.).
30. Novikova LYu, Seferova IV, Nekrasov AYu, et al. Impact of weather and climate on seed protein and oil content of soybean in the North Caucasus. *Vavilov Journal of genetics and breeding*. 2018;22(6):708-715. (In Russ.). DOI: 10.18699/VJ18.414.
31. Kim AR, Seol J, Lim BS, et al. Response of plant phenology on microclimate change depending on land use intensity in Seoul, Central Korea. *Forests*. 2024;15:718. DOI: 10.3390/f15040718.
32. Penalba OC, Bettolli ML, Vargas WM. The impact of climate variability on soybean yields in Argentina. Multivariate regression. *Meteor. Appl.* 2007;14:3-14.
33. Kozlov KN, Novikova LYu, Seferova IV, et al. Mathematical model of the effect of climatic factors on soybean development. *Biophysics*. 2018;63(1):136-137. DOI: 10.1134/S0006350918010086.
34. Pedersen P, Boote KJ, Jones JW, et al. Modifying the CROPGRO-soybean model to improve predictions for the upper Midwest. *Agron. J.* 2004;96(2):556-564. DOI: 10.2134/agronj2004.5560.
35. Setiyono TD, Weiss A, Specht JE, et al. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions. *Field Crops Research*. 2007;100(2-3):257-271. DOI: 10.1016/j.fcr.2006.07.011.
36. Novikova LYu, Lebedeva NV. Programma dlya prognozirovaniya reakcii sortov vinograda na izmeneniya klimata VITIS TIME SERIES. Svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM RU 2019664805, 13.11.2019. (In Russ.).
37. Lazarevsky MA. Rol' tepla v zhizni evropejskoj vinogradnoj lozy. Rostov-na-Donu: Rostov University Press, 1961. (In Russ.).
38. Khalafyan A.A. *STATISTICA 6. Matematicheskaya statistika s elementami teorii veroyatnostej*. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2010. (In Russ.).
39. Menzel A, Sparks TH, Estrella N, et al. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*. 2006;12(10):1969-1976. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x.

Статья принята к публикации 22.04.2025 / The article accepted for publication 22.04.2025.

Информация об авторах:

Любовь Юрьевна Новикова¹, ведущий научный сотрудник, исполняющая обязанности заведующей отделом автоматизированных информационных систем генетических ресурсов растений, доктор сельскохозяйственных наук

Ирина Владимировна Сеферова², ведущий научный сотрудник отдела генетических ресурсов зернобобовых культур, кандидат биологических наук

Information about the authors:

Lyubov Yuryevna Novikova¹, Leading Researcher, Acting Head of the Department of Automated Information Systems for Plant Genetic Resources, Doctor of Agricultural Sciences

Irina Vladimirovna Seferova², Leading Researcher at the Department of Genetic Resources of Leguminous Crops, Candidate of Biological Sciences