

УДК 574.2:581.5

ФЕНОЛОГИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ *QUERCUS PUBESCENS* WILLD. НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ СУХИХ СУБТРОПИКОВ

Корсакова С.П.

ФГБУН «Ордена Трудового Красного Знамени Никитский ботанический сад – Национальный
научный центр РАН», г. Ялта, Российская Федерация, e-mail: korsakova2002@mail.ru

Протестированы три фенологические модели для прогнозирования сроков разворачивания листьев, начала цветения и оценки возможных сдвигов весеннего развития *Quercus pubescens* Willd. в связи с изменением климата. Модель (M1) основана на методе накопления только тепловых единиц (F). Комбинированные модели (M2 и M3) – на последовательном накоплении охлаждающих и тепловых единиц (CF), причем модифицированная модель M3 также учитывает влияние фотопериода на растение. На основе данных наблюдений оптимизированы дата начала накопления тепловых единиц после завершения периода покоя, их необходимая сумма для начала фенофаз и пороговая температура. Начальной датой для накопления единиц охлаждения было выбрано 1 ноября. Для параметризации моделей использованы фенологические наблюдения и суточные данные температуры воздуха за период с 1936 по 2017 гг. Тестирование показало высокую степень адекватности при прогнозировании дат разворачивания листьев и начала цветения *Q. pubescens* модели M3, учитывающей влияние фотопериода. Простая тепловая модель и последовательные модели накопления охлаждающих и тепловых единиц совместно с метеорологическими прогнозами, основанными на трех сценариях изменения климата проекта CMIP5 (RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5) были использованы для оценки сроков разворачивания листьев и начала цветения *Q. pubescens* в течение 21-го столетия. Расчеты показали, что при развитии сценария RCP8.5 потепление может оказать значительное воздействие на выход почек из органического покоя, и как следствие – на сроки весеннего развития.

Ключевые слова: фенологические модели; *Quercus pubescens*; изменения климата; Южный берег Крыма

Введение

Реакция растений на возможные климатические изменения является одной из наиболее насущных проблем современной экологии. Особого внимания требуют древесные растения, которые имеют продолжительный онтогенез, ведут прикрепленный к субстрату образ жизни и не могут мигрировать достаточно быстро вслед за изменением их климатической ниши (Savolainen et al., 2007; Delzon et al., 2013). Другая проблема заключается в прогнозировании воздействия изменения климата на продолжительность вегетационного периода и, следовательно, на поглощение углерода и продуктивность лесов (Piao et al., 2008). Однако до сих пор точность прогноза фенологических реакций растений на будущие климатические условия ограничена (Körner and Basler, 2010; Chuine et al., 2010, 2016).

Многочисленными исследованиями отечественных и зарубежных ученых установлено, что на весеннее развитие растений (набухание и распускание почек, разворачивание листьев, цветение) значительное влияние оказывает температура воздуха, как в период органического (эндогенного) покоя, так и в период вынужденного, обусловленного экзогенными факторами (Карпухина и др., 2007; Жмылева и др., 2011; Chuine et al., 2003; Siljamo et al., 2008; Primack et al., 2009). Воздействие фотопериода также имеет значение, однако оно, как правило, менее выражено в сравнении с температурой (Mouradov et al., 2002; Laube et al., 2014).

В качестве основного инструмента, связывающего сроки наступления фенофаз (разворачивание листьев, цветение, созревание) с климатическими факторами, применяются фенологические модели (Гордеев и др., 2006; Ruml and Vulic, 2005).

Простейшие классические фенологические модели основаны на суммировании температур, превышающих заданный минимум (порог) от определенной даты до наступления фенологического явления (Chuine, 2000; Ladányi et al., 2010). Сумма полученных значений, выраженная в тепловых единицах (например, в градусо-сутках (GDD), эффективных температурах (СЭТ) и т.д.), показывает потребность организма в тепле для прохождения определенных фаз развития. Более сложные фенологические модели дополнительно учитывают потребность растения в накоплении единиц охлаждения, необходимых для завершения периода покоя (Chuine et al., 2003).

Некоторые авторы утверждают, что в современных климатических условиях выполнение необходимых требований охлаждения для выхода растений из глубокого покоя не является лимитирующим фактором (Linkosalo et al., 2006; Vitasse and Basler, 2013), поэтому часто простые модели имеют сходную или даже более высокую эффективность, чем сложные (Vitasse et al., 2011; Basler, 2016). Другая гипотеза заключается в том, что процесс воздействия охлаждения на развитие почек не моделируется с достаточной точностью (Linkosalo et al., 2006). Также предполагается, что недостаточные условия охлаждения могут быть компенсированы удлиненным фотопериодом (Судакевич Ю.Е., 1962; Caffarra and Donnelly, 2011; Zohner and Renner, 2015). Несмотря на то, что влияние фотопериода в качестве основного фактора для весеннего развития является спорным, его значение может увеличиться с глобальным потеплением и снижением охлаждающих температур (Körner and Basler, 2010; Malyshev et al., 2018).

В настоящее время разработано множество фенологических моделей для листопадных, хвойных древесных и плодовых пород умеренной зоны (Гордеев и др., 2006; Cannell and Smith, 1983; Murray et al., 1989; Hanninen, 1990; Chuine et al., 2003; Herms, 2004; Siljamo et al., 2008; Primack et al., 2009; Blümel and Chmielewski, 2012). Вместе с тем, климатические факторы как естественные стимуляторы фенологии растений в субтропиках и тропиках до сих пор изучены недостаточно, что значительно затрудняет точное прогнозирование воздействия изменения климата на рост растений и углеродный баланс в этих уникальных регионах (Sanchez-Azofeifa et al., 2013; Chen et al., 2017).

Учитывая вышеизложенное, цель данной работы – тестирование на базе Microsoft Excel и практическая реализация фенологических моделей для прогнозирования сроков весеннего развития древесных растений в условиях сухих субтропиков России (на примере дуба пушистого (*Quercus pubescens* Willd.)).

Материалы и методы

Место исследования, фенологические и метеорологические данные. Тестирование моделей проводилось в центральной части Южного берега Крыма (ЮБК) в районе Никитского ботанического сада (44°31'СШ, 34°15' ВД). В качестве объекта исследования был выбран дуб пушистый (*Quercus pubescens* Willd.), являющийся для экосистемы ЮБК одной из основных аборигенных лесообразующих пород (Гаркуша и др., 2012).

Климат Южного берега Крыма субтропический средиземноморского типа, характеризуется жарким сухим летом и мягкой влажной зимой. Средняя годовая температура воздуха составляет 12,6°C, а среднегодовое количество осадков – 592 мм (Плугатарь и др., 2015).

Для разработки моделей на основе многолетних данных фенологических наблюдений и метеорологических данных суточного разрешения (средних, минимальных, максимальных температур воздуха) была создана специальным образом организованная база данных в электронной таблице MS Excel 2010. Репрезентативные

данные температур воздуха по агрометеорологической станции Никитский сад за 1935-2017 гг. были получены из опубликованных агрометеорологических бюллетеней (форма ТСХ-8) и архива агрометеостанции. Исходные данные фенологических наблюдений за развертыванием первых листьев и началом цветения дуба пушистого с 1936 по 2017 гг. (в том числе наблюдения велись автором в течение 25 лет, с 1993 по 2017 гг.) были собраны в единую базу данных из различных архивных документов агрометеостанции Никитский сад. Фенологические наблюдения проводились по единой методике (Наставление гидрометеорологическим..., 1985) на постоянном участке и объектах, а накопленной базой данных обеспечивалось соблюдение принципа единственного различия – меняющегося климатического режима местности. Агрометеорологическая станция Никитский сад расположена в непосредственной близости от наблюдательного участка (менее 200 м).

Для тестирования фенологических моделей использовались данные за нечетные годы, а для валидации – за четные в период с 1936 по 2017 гг. Датой наступления фазы развития считался день ее наступления не менее чем у 50% растений (Наставление гидрометеорологическим..., 1985).

Фенологические модели и оптимизация параметров. В данном исследовании были протестированы три фенологические модели. Для каждой модели Sf_t – состояние внешнего воздействия (state of forcing), $Sf_t = F^*$ – необходимая сумма тепловых единиц (F^*) для наступления фазы развития, где t – время (сутки), $t = t_2$ – дата наступления фенофазы (день года (DOY)). Sc_t – состояние охлаждения (state of chilling), C^* – необходимая минимальная сумма единиц охлаждения для завершения периода органического (эндогенного) покоя, t – время (сутки), $t = t_1$ – дата выхода из органического покоя: потребность в единицах охлаждения (C^*) выполнена, начало внешнего воздействия (день года (DOY)). t_0 – начало периода накопления единиц охлаждения, (день года (DOY)); T_i – среднесуточная температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$); T_b – базовая температура для накопления сумм тепловых единиц ($^{\circ}\text{C}$); $Topt$ – оптимальная температура для накопления единиц охлаждения ($^{\circ}\text{C}$); DL – продолжительность светового дня (ч); β и γ – константы ($\beta > 0, \gamma < 0$); c – показатель значимости фотопериода.

M1 – модель внешнего воздействия (forcing model (F)) – классическая простая тепловая модель накопления сумм тепловых единиц (GDD), включает линейную реакцию растения на температуру, превышающую базовую (T_b), которая предполагает, что к началу года потребность в охлаждении была выполнена или растение не нуждается в пониженных температурах (Chuine et al., 2003; Herms, 2004):

$$Sf_t = \sum_{t=t_1}^{t=t_2} \begin{cases} 0, & T_t < T_b \\ T_t - T_b, & T_t \geq T_b \end{cases}, \text{ где } Sf_{t_2} = F^* , \quad (1)$$

Модель M1 содержит всего три параметра, которые необходимо определить (t_1 , T_b и F^*).

M2 – последовательная модель «охлаждение-внешнее воздействие» (chilling-forcing model (CF)) учитывает экспоненциальную зависимость между потребностью растения в охлаждении и накоплением сумм тепловых единиц (Murray et al. 1989). При этом предполагается, что накопление тепловых единиц не начинается до тех пор, пока не наступит предельная аккумуляция единиц охлаждения для завершения органического покоя. Описание модели M2 (Sarvas, 1974; Hänninen, 1990):

$$S_{c_t} = \sum_{t_0}^{t_1} \begin{cases} 0, & T_t \leq -3,4 \text{ или } T_t > 10,4 \\ \frac{T_t - (-3,4)}{T_{opt} - (-3,4)}, & -3,4 < T_t < T_{opt}, \text{ где } S_{ct1} = C^*, \\ \frac{T_t - 10,4}{T_{opt} - 10,4}, & T_{opt} < T_t < 10,4 \end{cases} \quad (2)$$

$$Sf_t = \sum_{t_1}^{t_2} \begin{cases} 0, & T_t < T_b \\ \frac{28,4}{1 + e^{-0,185(T_t - T_b - 18,4)}}, & T_t \geq T_b \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{и } Sf_{t_2} = F^* = \beta e^{\gamma S_{ct_1}}, \quad (4)$$

В этой модели определены пять параметров (t_1 , T_{opt} , T_b , β и γ). Накопление сумм единиц охлаждения начинали с фиксированной даты $t_0 = 1$ ноября.

МЗ – также последовательная модель «охлаждение-внешнее воздействие» (CF), для которой суммы накопления единиц охлаждения рассчитывались по уравнению (2), а соотношение между состоянием внешнего воздействия и состоянием охлаждения – по уравнению (4). Уравнение внешнего воздействия является модифицированным продолжением модели М1 с накоплением свето-термальных единиц, учитывающих фотопериод. В модели учитывается влияние продолжительности светлого периода суток (DL) на развитие растений (Blümel and Chmielewski, 2012):

$$Sf_t = \sum_{t_1}^{t_2} \begin{cases} 0, & T_t < T_b \\ (T_t - T_b) \times \left(\frac{DL}{10}\right)^c, & T_t \geq T_b \end{cases} \quad (5)$$

Данный подход имеет некоторое преимущество, особенно если фенологическая модель используется для выяснения возможных изменений в сроках фенологических явлений из-за изменения климата. Константа 10 в знаменателе – параметр нормирования, чтобы величины рассчитанных Sf_t значений были сопоставимы с исходными данными. Модель МЗ содержит шесть параметров, которые необходимо оптимизировать (t_1 , T_{opt} , T_b , β , γ и c). Накопление сумм единиц охлаждения начинали с фиксированной даты $t_0 = 1$ ноября.

Параметризация и оценка фенологических моделей. Параметры фенологических моделей на основе созданной электронной базы данных были определены эволюционным методом оптимизации с помощью надстройки Microsoft Excel «поиск решения» (SolveXL). Эволюционный метод использует генетический алгоритм (ГА), который является более гибким для решений хороших, близких к оптимальным сложных проблем для «негладких» функций (Winston and Albright, 2018).

Для сравнения точности аппроксимации моделей были использованы 4 индекса: коэффициент детерминации (R^2), корень из среднеквадратичной ошибки (Root Mean Squared Error – $RMSE$), скорректированный информационный критерий Акаике (AIC_c) и смещение ($Bias - \theta$):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - pre_i)^2}{\sum_{i=1}^n (obs_i - \overline{obs_i})^2}, \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - pre_i)^2}{n}}, \quad (7)$$

$$AIC_c = n \times \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - pre_i)^2}{n} \right) + 2 \times k + \left(\frac{2 \times k \times (k + 1)}{n - k - 1} \right), \quad (8)$$

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - pre_i)}{n}, \quad (9)$$

где: obs_i – наблюдаемая, $\overline{obs_i}$ – средняя наблюдаемая, pre_i – прогнозная дата наступления фенофазы (в днях года), n – число лет наблюдений, k – число параметров модели.

Климатические модели проекта CMIP5. Для прогнозирования возможных сдвигов весеннего развития дуба пушистого на Южном берегу Крыма при изменении климата использованы результаты расчетов в рамках международного проекта CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5), полученные при формировании 5-го оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, 2013-2014 гг.) (IPCC, 2013). В проекте CMIP5 используется прогнозный набор эмиссий по четырем сценариям, известным как Representative Concentration Pathways (RCPs) или Репрезентативные Траектории Концентраций (РТК) (IPCC, 2013). Сценарии представляют собой четыре возможные траектории эмиссии парниковых газов (ПГ) для различных вариантов глобального социально-экономического развития и получили обозначения RCP8.5 (Riahi et al., 2011), RCP6.0 (Masui et al., 2011), RCP4.5 (Thomson et al., 2011) и RCP2.6 (van Vuuren et al., 2011). Результаты модельных расчетов с использованием сценариев ПГ принято называть климатическими проекциями, чтобы подчеркнуть их условный, а не прогностический характер. Цифры обозначают приращение глобального радиационного баланса ($Вт/м^2$) с доиндустриального периода до 2100 г., обусловленное соответствующими эмиссиями ПГ. RCP4.5 был определен как наиболее реалистичный, а сценарий RCP 8.5 – как наиболее неблагоприятный.

Суточные данные метеовеличин за исторический период (1980–2005 гг.) и обработанные дельта (Delta) методом статистического даунскейлинга с выполненной коррекцией смещения на основе данных реанализа (Hijmans et al., 2005; Ramirez and Jarvis, 2010) результаты климатического моделирования (2015–2099 гг.) CMIP5 в ближайших к координатам метеорологических станций ЮБК узлах регулярной сетки в были предоставлены Международным центром по тропическому сельскому хозяйству (CIAT) и Исследовательской программой КГМСХИ по изменению климата, сельскому хозяйству и продовольственной безопасности (CCAFS) (Ramirez and Jarvis, 2008). В рамках исторического эксперимента была выбрана версия реанализа AgMERRA, содержащая поля непрерывных суточных данных за период 1980–2005 гг. По результатам сравнения данных реанализов с рядами инструментальных наблюдений на метеорологических станциях ЮБК за совместный исторический период была выполнена коррекция данных моделирования с учетом систематической погрешности (ИКАРДА, 2015).

В данной работе использованы выходные данные среднесуточных температур воздуха по ансамблю из 5 климатических моделей семейства CMIP5: BCC-CSM1.1, BCC-CSM1.1(m), IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM и MPI-ESM-MR. Выбор моделей был основан на результатах тестирования их способности описывать динамику климатических факторов на территории России и Крыма (Анисимов, Кокорев, 2013). Ансамблевый метод был применен с целью уменьшения неопределенности климатических проекций, связанной со случайными ошибками индивидуальных моделей, вследствие которых может увеличиться неопределенность в фенологических прогнозах (Dee et al., 2011).

В настоящее время невозможно точно установить какой именно из сценариев RCP осуществится в действительности. Результаты расчетов будущих изменений температуры приземного воздуха на территории России с помощью ансамбля

глобальных климатических моделей проекта CMIP5 для трех основных сценариев опубликованы на сайте Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО) (<http://voeikovmgo.ru/ru/izmenenie-klimata-v-rossii-v-xxi-veke?id=613>). Согласно этим данным, полученные путем интерполяции приближенные оценки повышения средней годовой температуры на территории Крыма в 2080-2099 годах по отношению к базовому климатическому периоду 1981–2000 гг. в зависимости от сценариев RCP составляют: 1,8°C (RCP2.6); 2,7°C (RCP4.5); 5,0°C (RCP8.5). Наиболее существенный рост температур ожидается в летний период – до 2,0-6,1°C, наименьший – в зимний и весенний периоды (до 1,2–4,4°C) в зависимости от сценария. По наиболее реалистичному сценарию (RCP 4.5) ожидается рост температуры зимнего сезона в конце XXI века на 2,4°C, а летнего – на 3,2°C. Уточненные оценки изменений температуры на территории Южного берега Крыма, полученные по 5 моделям, включенным в мультимодельный ансамбль, хорошо согласуются с сезонными тенденциями, выявленными ГГО для Крыма. Для сценария RCP 4.5 к концу XXI века, относительно 1981–2000 гг. на ЮБК ожидается следующий рост средних месячных температур: января – на 2,3°C; февраля – на 2,1°C; марта – на 2,2°C; апреля – на 2,4°C; мая – на 2,5°C; июня – на 2,8°C; июля – на 3,0°C; августа – на 3,1°C; сентября – на 2,9°C; октября – на 2,7°C; ноября – на 2,4°C и декабря – на 1,9°C.

Результаты и обсуждение

Анализ фенологических наблюдений за период 1936–2017 гг. показал, что средние даты развертывания первых листьев и начала цветения дуба пушистого на Южном берегу Крыма составили 26 апреля (± 8 дней) и 5 мая (± 8 дней), соответственно. Самая ранняя дата появления первых листьев отмечена 14 апреля (1937, 1975, 1977, 1986, 1989, 1998 и 2014 гг.), а самая поздняя – 14 мая (1987 г.). Самое раннее цветение наблюдалось в 1977 г. (18 апреля), а самое позднее – в 1965 и в 1987 (24 мая). Коэффициенты линейного тренда указывают на незначительные сдвиги фенодат (скорость смещения 0,2 и -0,4 дня за десятилетие), но тренды незначимы даже на 5% уровне. С 1981 г., при сохранении средних многолетних значений, наблюдается статистически значимая тенденция смещения начала цветения на более ранние сроки со средней скоростью 2,4 дня за 10 лет. После 2000 г. цветение дуба пушистого начиналось раньше в среднем на 3 дня (табл. 1).

Несмотря на отсутствие явных трендов в смещении сроков весенней вегетации *Q. pubescens* на ЮБК за 1936-2017 гг., корреляционно-регрессионный анализ выявил высоко значимую тесную обратную зависимость между сроками развертывания первых листьев ($r=-0,72$; $p<0,0001$), началом цветения ($r=-0,79$; $p<0,0001$) и температурами воздуха за апрель-май (рис. 1). При повышении температуры воздуха в марте-апреле на 1°C появление первых листьев и зацветание происходят в среднем на 3-4 дня раньше. Эти данные свидетельствуют о том, что сроки цветения и развертывания первых листьев у дуба пушистого на Южном берегу Крыма, как и у многих видов растений в других регионах Северного полушария, в значительной мере зависят от температурного режима в весенний период. Если весна устанавливается ранней и теплой, то цветение и развертывание листьев начинаются значительно раньше, чем в годы с поздней и холодной весной.

В процедуре подгонки и проверки моделей были использованы среднесуточные температуры воздуха с 1 ноября 1935 года по 31 мая 2017 года. Выбор начальной даты для расчета сумм накопления единиц охлаждения обусловлен тем, что устойчивый переход воздуха осенью через 10°C в сторону понижения, определяющий границы активной фазы вегетации растений, на Южном берегу Крыма отмечается в первой декаде ноября (Плугатарь и др., 2015).

Таблица 1.

Среднемесячная температура воздуха (°С), даты разворачивания первых листьев (РЛ) и начала цветения (Ц) *Quercus pubescens* Willd. на Южном берегу Крыма за 1936-2017 гг. и наблюдаемые тенденции

Показатель	Период, годы								
	1936-2017			1981-2017			2001-2017		
	Среднее	σ	Тренд (°С, день/10 лет)	Среднее	σ	Тренд (°С, день/10 лет)	Среднее	σ	Тренд (°С, день/10 лет)
Ноябрь	8,9	2,0	0,0	8,6	2,0	0,7*	9,5	1,9	0,1
Декабрь	5,5	1,8	0,0	5,3	1,8	0,4	5,8	1,8	1,5
Январь	3,3	2,0	0,1	3,6	1,4	0,0	3,8	1,6	-0,2
Февраль	3,3	2,0	0,1	3,3	1,9	0,6*	3,8	2,0	0,8
Март	5,2	1,7	0,2**	5,6	1,7	0,7*	6,2	1,7	1,0
Апрель	10,3	1,6	0,1	10,4	1,5	0,3	10,6	1,3	0,8
Май	15,5	1,5	0,2*	15,8	1,4	0,4*	16,4	1,5	0,3
Среднее за ноябрь-май	7,4	0,9	0,1*	7,5	0,9	0,5***	8,0	0,7	0,6
РЛ	26.IV	7,8	0,2	27.IV	8,2	-1,2	26.IV	6,9	-4,8
Ц	5.V	7,9	-0,4	5.V	7,5	-2,4*	2.V	5,9	-0,9

Примечание: σ – стандартное отклонение; тренды, имеющие высокую степень достоверности при уровнях статистической значимости: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

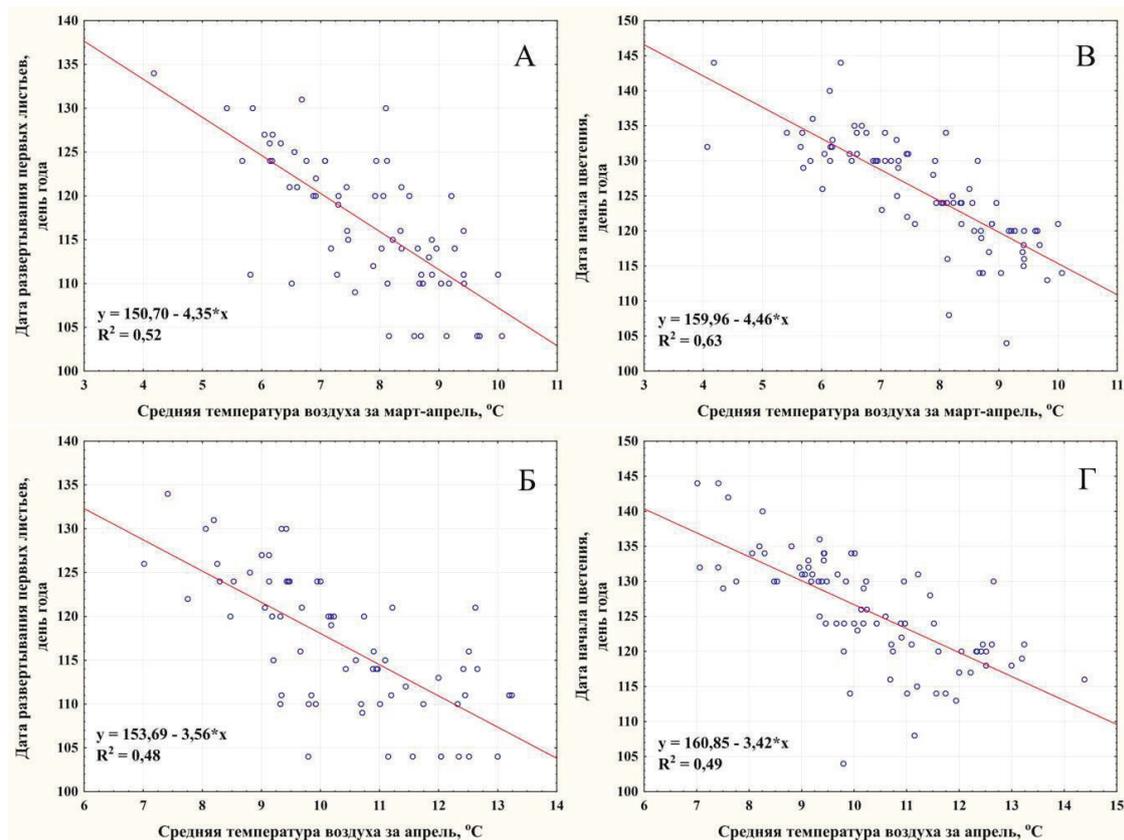


Рис. 1. Связь фенофаз разворачивания первых листьев (А, Б) и цветения (В, Г) *Quercus pubescens* Willd. с температурой воздуха в весенний период на Южном берегу Крыма в течение 1936-2017 гг. (R^2 – коэффициент детерминации, $p < 0,0001$)

По результатам многолетнего фенологического мониторинга, у большинства древесных пород на ЮБК расцветивание листьев и листопад наступают в третьей декаде октября – ноябре. Среднемесячная температура воздуха в ноябре снижается до $8,9^\circ\text{C}$ (табл. 1), поэтому этот месяц уже способствует накоплению в моделях единиц

охлаждения. При средней температуре декабря 5,5°C их накапливается значительно больше.

За рассматриваемый период средняя температура воздуха в исследуемом районе составила 7,4°C (табл. 1). В этот период наблюдалась статистически значимая слабая тенденция повышения температуры со средней скоростью 0,1°C за десятилетие. Количественная оценка значимости тренда и интенсивности за период с 1981 г. показала, что тенденция, отмеченная для 1936–2017 гг., в 1981–2017 гг. значительно усилилась. Тренд обладает высокой степенью достоверности (уровень статистической значимости $p < 0,001$). Наибольшая статистически значимая скорость роста температуры отмечалась в ноябре, феврале-марте и мае. Для периода 2001–2017 гг. также отмечен положительный тренд, но он статистически незначим. В первые десятилетия XXI века, по сравнению с 1936–2017 гг., средние температуры в ноябре, декабре-феврале и апреле повысились в среднем на 0,3–0,6°C, а в марте и мае – соответственно на 1,0 и 0,9°C. В связи с повышением температуры в феврале и марте (0,6–0,7°C/10 лет), с начала 1980-х годов на ЮБК отмечается общая тенденция сдвига на более ранние сроки начала вегетационного периода (устойчивый переход среднесуточных температур воздуха через 5°C в сторону повышения, при котором начинается активное развитие дикорастущих видов) с ускорением смещения в первых десятилетиях XXI века (Корсакова, Корсаков, 2018). Положительная динамика средних температур воздуха и климатические прогнозы указывают на возможное дальнейшее повышение температуры в исследуемом регионе.

С помощью надстройки Microsoft Excel «поиск решения» были оптимизированы наборы параметров моделей, обеспечивающие прогноз дат разворачивания первых листьев и начала цветения для *Q. pubescens* на ЮБК (табл. 2). Разница между величинами RMSE между периодом параметризации моделей и периодом валидации составила менее 2,5 дней.

Таблица 2.

Параметры моделей прогнозов дат распускания первых листьев и начала цветения *Quercus pubescens* Willd. на Южном берегу Крыма

Параметр		Фенологическая фаза развития					
		Разворачивание первых листьев			Начало цветения		
		Фенологическая модель			Фенологическая модель		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3
t_0 , дата			1.11	1.11		1.11	1.11
T_b , °C		0,0	7,1	4,0	0,0	8,3	4,0
F^* , °C		650,1	69,2	286,8	640,0	68,6	414,8
T_{opt} , °C			6,3	1,6		7,6	3,2
C^* , °C			35,6	30,8		32,8	32,4
$t1$, дата		04.01	08.01	04.01	04.02	27.01	21.01
β			124,1277	507,6180		121,7138	632,9013
γ			-0,0164	-0,0186		-0,0159	-0,0121
c				0,0000			0,6455
Результаты внутренней проверки	n , число лет	33	33	33	40	40	40
	R^2	0,48	0,69	0,77	0,71	0,71	0,76
	RMSE, дни	6,6	4,9	4,1	4,4	4,4	3,9
	AIC_c	131,2	120,9	107,8	122,5	130,4	123,9
	θ , дни	1,5	-0,2	0,4	0,7	-0,7	0,6
Результаты валидации	n , число лет	32	32	32	41	41	41
	R^2	0,30	0,51	0,39	0,70	0,58	0,73
	RMSE, дни	8,6	5,3	6,5	4,4	5,4	3,9
	θ , дни	-1,5	-2,0	-0,9	-0,5	-0,9	-0,2

Полученные модели преимущественно дают невысокие значения RMSE (менее семи дней, за исключением валидации модели M1 для развертывания первых листьев). Как для фенологической фазы развертывания листьев, так и для фазы цветения, результаты внутренней и внешней проверки указывают на согласованность закономерностей между моделями, т.е. модели, объясняющие наибольшую дисперсию наборов данных при внутренней проверке, обычно являются одними из наиболее точных для моделирования дат фенофаз во внешних условиях (и наоборот, табл. 2). Межгодовую изменчивость дат развертывания первых листьев лучше описывают модели M2 и M3, охватывающие периоды и органического и вынужденного покоя. Несмотря на самое большое количество параметров ($k=6$), наиболее точное ($RMSE=4,1$) и эффективное ($AICc=107,8$) прогнозирование даты развертывания листьев, согласно большинству индексов оценки качества, показала модель M3, учитывающая воздействие фотопериода на фенологическое развитие. Эта же модель показала и наименьшую величину смещения между наблюдаемыми и прогнозируемыми значениями. Наихудшие результаты прогнозирования даты развертывания первых листьев по всем критериям оценки были получены при использовании простой тепловой модели M1 (табл. 2). Оценка качества прогнозирования фазы начала цветения дуба пушистого показала, что в целом, различия между моделями M1, M2 и M3 невелики. Несколько выше были показатели для модели M3, учитывающей фотопериод и объясняющей до 76% дисперсии переменной. По расчетам всех трех моделей начало накопления тепловых единиц для зацветания *Q. pubescens* отмечено на 3–4 недели позже, чем для развертывания листьев. Точность прогноза используемых моделей для фенофазы начала цветения была выше, чем для фазы развертывания первых листьев. В целом, взаимосвязь между наблюдаемыми и моделируемыми значениями находилась на приемлемом для фенологических моделей уровне.

Согласно GDD-модели M1, основанной только на накоплении тепловых единиц, развертывание первых листьев у дуба пушистого на ЮБК наступает при накоплении с 4 января около 650°C , а начало цветения – при накоплении 640°C с 4 февраля эффективных температур воздуха (GDD) выше 0°C ($T_b = 0,0^{\circ}\text{C}$). Базовая температура, оптимизированная в модели M1, имеет преимущество в простоте при использовании, поскольку накопление тепловых единиц рассчитывается простым суммированием положительных значений среднесуточных температур воздуха. Модель M1 показала довольно высокие значения RMSE для фазы развертывания первых листьев (6,6–8,6 дней) и значительно ниже – для начала цветения (4,4 дня). В отдельные годы различия между прогнозируемыми по модели M1 и наблюдаемыми датами развертывания листьев достигали 10–12 дней, а в единичные – 17–19 дней (1940, 1956 и 2016 гг.).

Более высокие значения показателя значимости фотопериода (табл. 2) позволяют предположить, что у дуба пушистого фотопериодически более чувствительна фенологическая фаза цветения, чем фаза развертывания листьев.

Фактические и рассчитанные по трем моделям (M1, M2, M3) даты весенней фенологии дуба пушистого на ЮБК за весь период наблюдений представлены в виде совмещенных графиков (рис. 2). Самая поздняя дата развертывания листьев и цветения на ЮБК в 1942 и 1987 годах была подтверждена расчетами во всех трех моделях. Самое раннее развертывание листьев в 1977 году было подтверждено расчетами только в моделях M2 и M3. Очень раннее начало цветения в 1947 и в 2014 годах довольно точно смоделировали все три модели. Однако, в 2016 году начало цветения было спрогнозировано на 9–11 дней раньше наблюдаемого. Результаты тестирования фенологических моделей показали, что в целом все модели довольно хорошо описывают межгодовую изменчивость дат развертывания листьев и цветения дуба пушистого как в периоды похолоданий, так и в периоды потеплений на ЮБК в течение 1936–2017 гг.

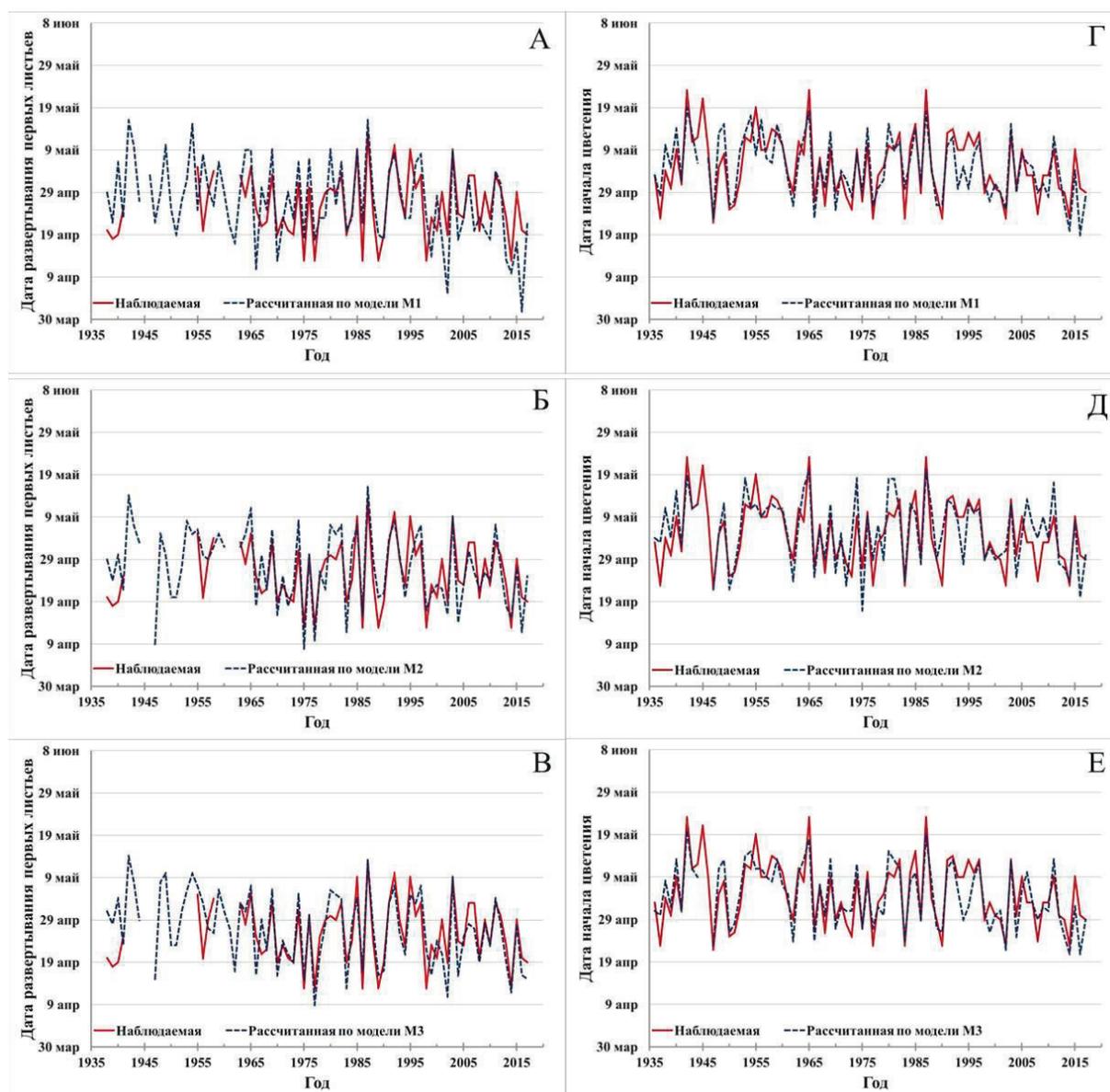


Рис. 2. Сравнение наблюдаемых (сплошная линия) и рассчитанных (пунктирная линия) по моделям М1 (А, Г), М2 (Б, Д) и М3 (В, Е) дат разворачивания первых листьев (слева) и начала цветения (справа) *Quercus pubescens* Willd. на Южном берегу Крыма в период с 1936 по 2017 гг.

Полученные фенологические модели были использованы при прогнозировании возможных изменений в сроках разворачивания первых листьев и начала цветения дуба пушистого для будущих климатических условий Южного берега Крыма. Входными данными фенологических моделей М1, М2 и М3 являлись среднесуточные значения температуры воздуха за период с 2021 по 2099 гг., полученные в результате расчетов по климатическому ансамблю из 5 моделей проекта СМIP5 для Южного берега Крыма. По трем основным сценариям (RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5) была построена проекция согласованных изменений климата и весенней фенологии дуба пушистого на 2021–2099 гг. Для осредненных по 20-летиям периодов с 1938 по 2099 гг. были рассчитаны аномалии дат разворачивания первых листьев и начала цветения по отношению к периоду 1981–2000 гг., принятого базовым (рис. 3). На рисунке 3 будущие отклонения в сроках весеннего развития по наиболее реалистичному сценарию RCP4.5, также, как и по данным наблюдений, обозначены сплошной линией. Результаты расчетов показали, что для различных климатических сценариев и в зависимости от

фенологической модели проявилась различная фенологическая реакция на прогнозируемый рост температур в течение XXI столетия.

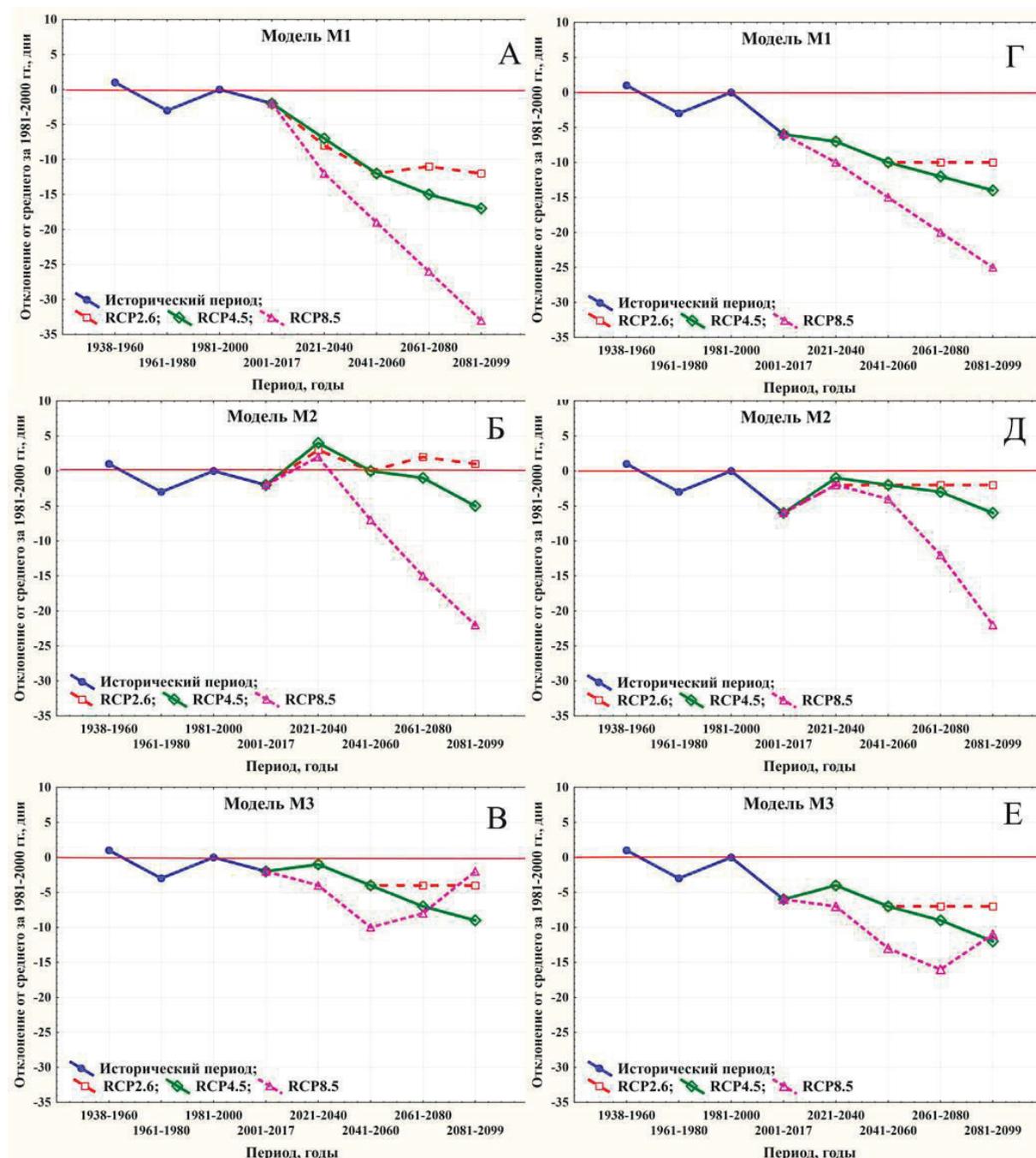


Рис. 3. Наблюдаемые и прогнозируемые по фенологическим моделям (M1, M2, M3) и ансамблю из 5 климатических моделей аномалии (дни) дат развертывания первых листьев (А–В) и начала цветения (Г–Е) *Quercus pubescens* Willd на Южном берегу Крыма до конца XXI века при различных сценариях RCP по отношению к базовому периоду 1981–2000 гг.

При расчетах по модели M1 (рис. 3А, 3Г), учитывающей только накопление тепловых единиц, для сценариев RCP4.5 и RCP8.5 до конца XXI предполагается синхронное последовательное смещение на более ранние сроки как фазы развертывания листьев, так и начала цветения. При реализации сценария RCP2.6, во второй половине XXI столетия ожидается стабилизация сроков весеннего развития

дуба пушистого вследствие прекращения роста температур в январе-апреле. Проведенные расчеты позволяют предположить, что фенологическая фаза разворачивание первых листьев у *Q. pubescens* более чувствительна к повышению температур. В зависимости от сценария, в сравнении с периодом 1981–2000 гг., величина сдвига на более ранние сроки разворачивания листьев к 2080 может составлять от 12 (RCP2.6) до 33 (RCP8.5) суток, а для начала цветения соответственно – от 10 до 25 дней.

Модели М2 и М3 дополнительно учитывают потребность растения в накоплении единиц охлаждения, необходимых для завершения периода покоя. Анализ результатов, полученных при расчетах по моделям М2 (рис. 3Б, 3Д) и М3 (рис. 3В и 3Е), позволяет констатировать существенные различия прогноза фенологического развития, как в скоростных режимах так и в тенденции смещения даты наступления каждой фазы. При этом, каждая спроецированная фаза развития дуба пушистого имела свою индивидуальную специфику изменения. Однако, вместе с тем, представляется возможным отметить и ряд общих закономерностей в их динамике. Так, в период 2021–2040 гг. для всех сценариев RCP ожидается сохранение или смещение дат наступления весенних фенофаз на более поздние сроки, в сравнении с 2001–2017 гг. В дальнейшем, с ростом температур в осенне-зимне-весенний период, при расчетах по модели М2 в случае реализации сценария RCP4.5 ожидается постепенное отрицательное синхронное смещение весенней вегетации до конца XXI столетия: даты разворачивания листьев – на 5 дней, начала цветения – на 6 дней по сравнению с 1981–2000 гг. При развитии сценария RCP8.5, с резким ростом температур ожидаются и сдвиги активной вегетации на более раннее время, которые в 2081–2099 гг. могут достигнуть 22 дней по сравнению с базовым периодом. При самом оптимистичном сценарии RCP2.6 до конца XXI столетия существенных изменений в весеннем развитии *Q. pubescens* не ожидается.

Расчеты по модели М3, учитывающей воздействие фотопериода и имеющей лучшие результаты тестирования среди фенологических моделей по качеству прогнозирования показали, что в случае реализации самого неблагоприятного климатического сценария RCP8.5, из-за интенсивного роста температур, к середине XXI столетия необходимые для окончания периода органического покоя дуба пушистого суммы единиц охлаждения не смогут накопиться за зимний период. Можно предположить, что недостаточные условия охлаждения будут компенсированы удлиненным фотопериодом. В связи с этим, во второй половине XXI века существует вероятность сдвига начальных фаз вегетации на более поздние даты: разворачивания первых листьев – на 8 дней, начала цветения – на 5 дней. По сценарию RCP4.5, с 2041–2060 гг. предполагается динамическое смещение вегетации в сторону более раннего развития на 5–6 дней до конца столетия по сравнению с 1981–2017 гг. А в ближайшие 20 лет значительных изменений в сроках весеннего развития дуба пушистого на ЮБК не ожидается, что согласуется с данными, полученными при расчетах по модели М2.

Таким образом, прогнозы наступления фаз весенней вегетации и их смещения в рамках сценариев изменения климата в значительной степени зависят от структуры фенологической модели, что требует лучшего понимания взаимодействия различных конкретных функциональных типов растений (по чувствительности к фотопериоду, потребности в пониженных температурах и т.д.) с факторами окружающей среды.

Выводы

Модели для прогнозирования сроков весеннего развития *Q. pubescens* на Южном берегу Крыма, представленные в данной работе, могут быть использованы для различных применений. Модель М1 – это модель чистой аккумуляции тепловых единиц, которая позволяет спрогнозировать разворачивание первых листьев и начало

цветения дуба пушистого при условии предположения, что период покоя будет завершен к концу текущего года или в начале следующего. Для современных климатических условий ЮБК это предположение, очевидно, верно. Поскольку модель проста в обращении, ее можно использовать для прогнозирования, даже если средняя точность моделей составляет 6–7 дней. Эти оценки очень важны при планировании работ по защите лесов ЮБК от вредителей и болезней.

Последовательные модели (М2 и М3), показавшие большую эффективность по результатам тестирования, позволяют учитывать потребности древесных пород в определенном температурном режиме, необходимом для их развития и роста в осенне-зимне-весенний период и могут дополнительно использоваться для проецирования возможных в будущем сдвигов во времени периода вегетации вслед за изменениями климата. Кроме того, эти модели полезны для дополнения отсутствующих данных в фенологических временных рядах или для их расширения.

Полученные результаты согласуются с мнением многих исследователей о том, что простые модели накопления сумм тепловых единиц в период вынужденного покоя могут обеспечивать довольно хорошую результативность в сравнении со сложными моделями, охватывающими периоды органического и вынужденного покоя растений, если влияние факторов внешней среды на развитие почки не моделируется точно. Высокие показатели простой модели также указывают на то, что в текущих климатических условиях накопление единиц охлаждения не является лимитирующим фактором для окончания глубокого покоя.

Ожидаемое значительное повышение температуры в зимние месяцы может вызвать сдвиг в окончании периода покоя в зависимости от потребности породы в пониженных температурах и, как следствие, изменить время начала весенней вегетации. Это говорит о том, что простые модели внешнего воздействия с накоплением сумм тепловых единиц с начала года, вероятно, не будут иметь достаточной точности. В связи с этим, для будущих климатических условий необходимо использовать комбинированные CF-модели.

Чтобы сделать фенологические модели более реалистичными с биологической точки зрения и тем самым повысить их способность к прогнозированию, необходимы дальнейшие исследования путем проведения специально спланированных экспериментов, направленных на выяснение экологических и биологических механизмов, лежащих в основе весеннего роста растительности и, следовательно, реакции видов и экосистем на происходящие изменения климата.

Представленная методология может быть применена для оптимизации моделей развития растений к любым древесным породам на основе фенологических и метеорологических наблюдений. Любому ученому-исследователю, имеющему под рукой такой общедоступный современный инструмент для анализа и моделирования как EXCEL, под силу моделирование оптимизационных и других моделей любой сложности.

Благодарности. Автор выражает признательность начальнику агрометеорологической станции Никитский сад ФГБУ «Крымское УГМС» П. Б. Корсакову за помощь при обработке фенологических данных и данных моделирования SMIP5.

Список литературы

1. Анисимов О.А., Кокорев В.А. Об оптимальном выборе гидродинамических моделей для оценки влияния изменений климата на криосферу // Лед и Снег. – 2013. – Том. 121. – № 1. – С. 83–92.

2. Гаркуша Л. Я., Багрова Л. А., Позаченюк Е. А. Разнообразие ландшафтов Крыма со средиземноморскими элементами флоры // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского Серия "География". – Том 25 (64). – 2012 г. – №2. – С.36–47.
3. Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., Сиротенко О.Д. Биоклиматический потенциал России: теория и практика. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. – 512 с.
4. Жмылева А.П., Карпухина Е.А., Жмылев П.Ю. Фенологическая реакция лесных растений на потепление климата: рано- и поздноцветущие виды // Вестник РУДН, серия Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 2. – С. 5–15.
5. ИКАРДА. Загрузка прогностических метеорологических данных с сайтов Earth System Grid Federation (ESGF) // ИКАРДА (Международный центр по сельскохозяйственным исследованиям в засушливых зонах). – 2015. – 24 с. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://cas-program.org/files/Manual_on_CC_data_downloading_and_processing_ru.pdf (дата обращения: 10.07.2018).
6. Карпухина Е.А., Жмылёв П.Ю., Жмылёва А.П. Зимний покой и весеннее распускание почек лесных растений // Вестник РУДН. Серия «Экология и безопасность жизнедеятельности». – 2007. – № 1. – С. 5–11.
7. Корсакова С.П., Корсаков П.Б. Динамика временных границ климатических сезонов на Южном берегу Крыма в условиях изменения климата // Бюллетень ГНБС. – 2018. – № 127. – С. 107–115. DOI: 10.25684/NBG.boolt.127.2018.15
8. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 11. Агрометеорологические наблюдения на станциях и постах. Ч. 1. Основные агрометеорологические наблюдения. – Л.: Гидрометеиздат, – 1985. – 316 с.
9. Официальный сайт ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова». Раздел «Изменения климата в России в 21 веке (модели CMIP 5)». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://voeikovmgo.ru/ru/izmenenie-klimata-v-rossii-v-xxi-veke?id=613>. (дата обращения: 10.07.2018).
10. Плуатарь Ю.В., Корсакова С.П., Ильницкий О.А. Экологический мониторинг Южного берега Крыма. – Симферополь : ИТ «АРИАЛ», 2015. – 164 с.
11. Судакевич Ю.Е. Влияние климатических условий на зимнее развитие плодовых культур // Труды ГНБС, 1962. – Том. XXXVI. – С. 47–64.
12. Basler D. Evaluating phenological models for the prediction of leaf-out dates in six temperate tree species across central Europe // Agricultural and Forest Meteorology. – 2016. – Vol. 217, – P. 10–21.
13. Blümel K., Chmielewski, F.M. Shortcomings of classical phenological forcing models and a way to overcome them // Agricultural and Forest Meteorology. – 2012. – Vol. 164. – P. 10–19. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.05.001
14. Caffarra A., Donnelly A. The ecological significance of phenology in four different tree species: effects of light and temperature on bud burst // International Journal of Biometeorology. – 2011. – Vol. 55. – Issue. 5. – P. 711–721.
15. Cannell M.G.R., Smith R.I. Thermal Time, Chill Days and Prediction of Budburst in *Picea sitchensis* // Journal of Applied Ecology. 1983. – Vol. 20(3). – P. 951–963. <http://www.jstor.org/stable/2403139>
16. Chen X., Wanga L., Inouye D. Delayed response of spring phenology to global warming in subtropics and tropics // Agricultural and Forest Meteorology. – 2017. – Vol. 234. – P. 222–235.
17. Chuine I. A unified model for budburst of trees // Journal of Theoretical Biology. – 2000. – Vol. 207. – P. 337–347. <https://doi.org/10.1006/jtbi.2000.2178> Pub Med

18. *Chuine I., Bonhomme M., Legave J.M., Garciade Cortazar A., Charrier G., Lacoïnte A., Améglio T.* Can phenological models predict tree phenology accurately in the future? The unrevealed hurdle of endodormancy break // *Global Change Biology*. – 2016. – Vol. 22. – P. 3444–3460.
19. *Chuine I., Kramer K., Hänninen H.* Plant development models. In: *Phenology: an integrative environmental science*. – 2003. – 1st edn. Ed. M.D. Schwartz (Kluwer Press: Milwaukee, WI). – P. 217–235. DOI: 10.1007/978-94-007-0632-3_14
20. *Chuine I., Morin X., Bugmann H.* Warming, photoperiods, and tree phenology // *Science*. – 2010. – Vol. 329. – P. 277–278.
21. *Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Alonso-Balmaseda M., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A., van de Berg L., Bidlot J.-R., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen I., Kållberg P.W., Köhler M., Matricardi M., McNally A., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2011. – Vol. 137. – №. 656. – P. 553–597.
22. *Delzon S., Urli M., Samalens J.C., Lamy J.B., Lischke H., Sin F., Zimmermann N.E., Porte A.J.* Field evidence of colonisation by Holm Oak, at the Northern Margin of its distribution range, during the anthropocene period // *PLoS ONE*. – 2013. Nov 18;8(11):e80443. doi: 10.1371/journal.pone.0080443. eCollection 2013.
23. *Hänninen H.* Modelling bud dormancy release in trees from cool and temperate regions // *Acta Forestalia Fennica*. – 1990. – Vol. 213. – P. 1–47. <http://hdl.handle.net/1975/9315>
24. *Herms D. A.* Using degree-days and plant phenology to predict pest activity. In: *Krischik, V., Davidson, J., eds. IPM (Integrated Pest Management) of Midwest Landscapes* // Minnesota Agricultural Experiment Station Publication. – 2004. – Vol. 58-07645. – P. 49–59.
25. *Hijmans R. ., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.G., Jarvis A.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // *International Journal of Climatology*. – 2005. – Vol. – 25(15). P. 1965–1978. Режим доступа: <http://www.worldclim.org/version1>
26. *IPCC 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley.* – 2013, Cambridge, UK: Cambridge University Press. – 1535 p.
27. *Körner C., Basler D.* Phenology under global warming // *Science*. – 2010. – Vol. 327. – P. 1461–1462.
28. *Ladányi M., Persely S., Nyéki J., Szabó Z.* From phenology models to risk indicator analysis // *Agricultural Informatics*. – 2010. – Vol. 1(2). – P. 8–16.
29. *Laube J., Sparks T.H., Estrella N., Höfler J., Ankerst D.P., Menzel A.* Chilling outweighs photoperiod in preventing precocious spring development // *Global Change Biology*. – 2014. – Vol. 20. – P. 170–182.
30. *Linkosalo T., Hakkinen R., Hanninen H.* Models of the spring phenology of boreal and temperate trees: is there something missing? // *Tree Physiology*. – 2006. – Vol. – 26. – P. 1165–1172.
31. *Malyshev A.V., Henry H.A.L., Bolte A., Khan M.A.S.A., Kreyling J.* Temporal photoperiod sensitivity and forcing requirements for budburst in temperate tree seedlings // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2018. – Vol. – 218. – P. 82–90
32. *Masui T., Matsumoto K., Hijioka I. et al.* An emission pathway for stabilization at 6 Wm⁻² radiative forcing // *Climatic Change*. – 2011. – Vol. – 109, № 1–2. – P. 59–76.

33. Mouradov A., Cremer F., Coupland G. Control of flowering time: interacting pathways as a basis for diversity // *Plant Cell*. – 2002. – Vol. 14 (Suppl). – P. 111–130.
34. Murray M., Cannell G. Smith R. Date of budburst of fifteen tree species in Britain following climatic warming // *Journal of Applied Ecology*. – 1989. – Vol. 26. – P. 693–700. <http://www.jstor.org/stable/2404093>
35. Piao S., Ciais P., Friedlingstein P., Peylin P., Reichstein M., Luysaert S., Margolis H., Fang J., Barr A., Chen A., Grelle A., Hollinger D.Y., Laurila T., Lindroth A., Richardson A.D., Vesala T. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming // *Nature*. – 2008. – Vol. 451. – P. 49–52.
36. Primack R.B., Ibáñez I., Higuchi H., Lee S.D., Miller-Rushing A.J., Wilson A.M., Silander J.A. Spatial and interspecific variability in phenological responses to warming temperatures // *Biological Conservation*. – 2009. – Vol. 142. – P. 2569–2577. DOI: 10.1016/j.biocon.2009.06.003
37. Ramirez J., Jarvis A. High resolution statistically downscaled future climate surfaces. International Center for Tropical Agriculture (CIAT); CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). 2008. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ccafs-climate.org/data/> (дата обращения: 7.02.2018, 4.07.2018).
38. Ramirez Villejas, J., Jarvis A. Downscaling Global Circulation Model Outputs: The Delta Method Decision and Policy Analysis Working Paper No. 1. – International Center for Tropical Agriculture (CIAT). Cali. CO, 2010. – 18 p.
39. Riahi K., Rao S., Krey V., et al. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions // *Climatic Change*. – 2011 – Vol. 109. – Iss. 1–2. – P. 33–57.
40. Ruml M., Vulić T., Importance of phenological observations and predictions in agriculture // *Journal of Agricultural Sciences*. – 2005. – Vol. 50, № 2. – P. 217–225. DOI: 10.2298/JAS0502217R
41. Sanchez-Azofeifa A., Kalacska M.E., Quesada M., Stoner K.E., Lobo J.A., Arroyo-Mora P. Tropical dry climates / In: Schwartz, M.D. (Ed.), *Phenology: An Integrative Environmental Science*. Springer Netherlands, Dordrecht, 2013. – P. 157–171.
42. Sarvas R. Investigations on the annual cycle of development of forest trees. Autumn dormancy and winter dormancy // *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*. – 1974. – Vol. 84. – P. 1–101.
43. Savolainen O., Pyhajarvi T., Knurr T. Gene flow and local adaptation in trees // *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*. – 2007. – Vol. 38. – P. 595–619.
44. Siljamo P., Sofiev M., Ranta H., Linkosalo T., Kubin E., Ahas R., Genikhovich E., Jatzcak K., Jato V., Nekovář J., Minin A., Severova E., Shalaboda V. Representativeness of point-wise phenological *Betula* data collected in different parts of Europe // *Global Ecology and Biogeography*. – 2008. – Vol. 17. – P. 489–502. DOI:10.1111/j.1466-8238.2008.00383.x
45. Thomson A.M., Calvin K.V., Smith S.J. et al. RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100 // *Climatic Change*. – 2011. – Vol. – 109. – P. 77–94.
46. van Vuuren D.P., Edmonds J., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., Hurtt G.C., Kram T., Krey V., Lamarque J-F., Masui T., Meinshausen M., Nakicenovic N., Smith S.J., Rose S.K. The representative concentration pathways: an overview // *Climatic Change*. – 2011. – Vol. – 109. – P. 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
47. Vitasse Y., Basler D. What role for photoperiod in the bud burst phenology of European beech // *Europe Journal Forest Recourses*. – 2013. – Vol. 132. – P. 1–8. DOI 10.1007/s10342-012-0661-2
48. Vitasse Y., Francois C., Delpierre N., Dufrene E., Kremer A., Chuine I., Delzon S., Assessing the effects of climate change on the phenology of European temperate trees // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2011. – Vol. 151. – P. 969–980.
49. Winston W.L., Albright S.CH. *Practical Management Science*, 6E, geared entirely to Excel 2016 (Cengage Learning), 2018. – 50 p.

50. Zohner C., Renner S. Perception of photoperiod in individual buds of mature trees regulates leaf-out // *New Phytologist*. – 2015. – Vol. 208 (4). – P. 1023–1030.

PHENOLOGICAL RESPONSE TO THE CLIMATE CHANGE OF *QUERCUS PUBESCENS* WILLD. UNDER CONDITIONS OF DRY SUBTROPICAL

Korsakova S.P.

FSBIS of the order of the Red Banner of Labour Nikitsky Botanical Garden – National Scientific Center of RAS, Yalta, Russian Federation, e-mail: korsakova2002@mail.ru

Three phenological models were examined with respect to their suitability to predict of leaf unfolding, beginning of flowering and to estimate possible shifts in the timing terms spring onset growth of *Quercus pubescens* Willd. due to climate change. One of the approaches was pure forcing (F) model (M1) and another the remaining two models (M2 and M3) were combined sequential chilling-forcing (CF) models. Of them the M3 model was modified CF model and included photoperiod. The starting date of temperature accumulation, base temperature and the forcing requirements were optimized on the basis of observed data. The starting date for the chilling-forcing models was set to 1 November. Phenological observations and temperature data in the period 1936–2017 were used to fit these models. Testing of phenological models showed highly relevant to simulate leaf unfolding and beginning of flowering dates for *Q. pubescens* by M3 model integrating a photoperiod cue. The pure forcing model and chilling-forcing sequential models together with meteorological projections based on three climate change scenarios CMIP5 project (RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5), were used to estimate *Q. pubescens* leaf unfolding and beginning of flowering dates along the 21st Century. Modeling studies predict that warming RCP8.5 scenario might severely affect bud dormancy release and as a result on the terms of spring onset growth.

Key words: phenological models; *Quercus pubescens*; Climate change; Southern coast of the Crimea.

Поступила в редакцию 23.08.2018 г