

УДК 574.2:581.5

РЕАКЦИЯ ФЕНОИНДИКАТОРОВ УМЕРЕННЫХ ШИРОТ НА ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА В СУХИХ СУБТРОПИКАХ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ

Корсакова С. П.

*ФГБУН «Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН», Ялта,
Республика Крым, Россия
E-mail: korsakova2002@mail.ru*

Проведено тестирование трех фенологических моделей для прогнозирования сроков развертывания листьев, начала цветения и оценки возможных сдвигов весеннего развития панареальных феноиндикаторов *Syringa vulgaris* L., *Rosa canina* L. и *Tilia cordata* Mill. в связи с изменением климата. На основе данных наблюдений оптимизированы даты начала накопления тепловых единиц после завершения периода покоя, необходимые суммы для начала фенофаз и пороговые температуры. Начальной датой для накопления единиц охлаждения было выбрано 1 ноября. Для параметризации моделей использованы фенологические наблюдения и суточные значения температуры воздуха за период с 1936 по 2017 годов. Тестирование показало высокую степень адекватности при прогнозировании дат развертывания листьев и начала цветения моделью М3, учитывающей влияние фотопериода.

Ключевые слова: фенологические модели, изменения климата, развертывание листьев, цветение, Южный берег Крыма.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ и прогнозирование «отклика растений» на различные по степени интенсивности климатические изменения в настоящее время являются основными проблемами геоэкологических исследований [1, 2]. Изучению таких откликов отводят особую роль, так как именно изменения в жизни растений могут существенно повлиять как на отдельные компоненты экосистемы, так на всю экосистему в целом [3]. Обобщенные анализы наблюдений, проводимых в Северном полушарии большей частью в прошлом столетии, показали заметное смещение дат наступления фенологических событий в последние десятилетия [4–6]. Основным фактором этих смещений является повышение температуры воздуха, связанное с изменением климата, особенно в зимний и весенний периоды года [6–9]. Однако в разных регионах Северного полушария фенологические тренды или реакция растений на потепление различны [6]. Это может быть связано с региональными особенностями формирования климата, условиями местообитания [10] и эколого-биологическими особенностями видов, их фенотипической пластичностью [11, 12]. Систематические наблюдения за одним и тем же объектом в различных географических пунктах позволяют установить скорость прохождения этих

изменений в широтном и долготном направлениях и определить величину фенологических градиентов. В качестве объектов для систематических наблюдений с целью оценки и прогнозирования состояний геосистемы используют индикаторные виды растений – феноиндикаторы. Наибольший интерес для оценки и прогнозирования состояния геосистемы при изменении климата представляют панареальные феноиндикаторы – те, которые сохраняют устойчивое индикационное значение на всей той территории, в пределах которой они встречаются [13].

Так, зацветание сирени (*Syringa vulgaris* L.) на всем ее ареале сохраняет свое значение как один из основных индикаторов последнего подсезона весны [14]. Дата начала цветения шиповника (*Rosa canina* L.) традиционно определяет начало лета [15], а зацветание липы секции *Eutilia* Neibr. (*Tilia cordata* Mill, и *T. amurensis* Rupr.) – панареальный индикатор наступления его середины [6, 14]. Эти виды довольно широко распространены на территории Южного берега Крыма (ЮБК) в лесах и в парках.

В качестве основного инструмента, связывающего сроки наступления фенологических явлений с климатическими факторами, используются фенологические модели [16, 17]. Простейшие фенологические модели основаны на простом суммировании температур, превышающих заданный порог от определенной даты до наступления фенологического события [16]. Более сложные также дополнительно учитывают потребность растения в накоплении единиц охлаждения, необходимых для завершения периода покоя [18]. В настоящее время разработано множество таких моделей для листопадных, хвойных древесных и плодовых пород умеренной зоны [16, 18–20], однако фенологическая реакция растений на климатические изменения в субтропиках до сих пор изучена недостаточно.

Цель работы – практическая реализация фенологических моделей для прогнозирования сроков весеннего развития панареальных феноиндикаторов в условиях сухих субтропиков России и ожидаемые их изменения до конца XXI века.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использованы результаты фенологических и метеорологических наблюдений (данные агрометеостанции Никитский сад) на территории центральной части ЮБК в районе Никитского ботанического сада (44°31'СШ, 34°15' ВД). Агрометеорологическая станция Никитский сад расположена в непосредственной близости от наблюдательного участка (менее 200 м). Климат ЮБК субтропический средиземноморского типа, характеризуется жарким сухим летом и мягкой влажной зимой. Средняя годовая температура воздуха составляет 12,6 °С, а среднегодовое количество осадков – 592 мм [21].

Репрезентативные данные температур воздуха за 1936–2017 гг. были получены из опубликованных агрометеорологических бюллетеней (форма ТСХ–8) и архива агрометеостанции Никитский сад. Исходные данные фенологических наблюдений за разворачиванием первых листьев (РЛ) и началом цветения (Ц) сирени обыкновенной (*Syringa vulgaris* L., РЛ: 1953–2017 гг. ; Ц: 1937–2017 гг.); шиповника собачьего (*Rosa canina* L., РЛ: 1954–2017 гг.; Ц: 1947–2017 гг.) и липы

сердцевидной (*Tilia cordata* Mill., РЛ: 1953–2017 гг.; Ц: 1937–2017 гг.) были собраны в единую базу данных из различных архивных документов агрометеостанции Никитский сад. В течение последних 25 лет, с 1993 по 2017 гг. наблюдения велись автором. Фенологические наблюдения проводились по единой методике [22] на постоянном участке и объектах, а накопленной базой данных обеспечивалось соблюдение принципа единственного различия – меняющегося климатического режима местности.

Для тестирования фенологических моделей использовались данные нечетных годов, а для валидации – четных. Датой наступления фазы развития считался день ее наступления не менее чем у 50 % растений [22]. 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_t – среднесуточная температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$); T_b – базовая температура для накопления сумм тепловых единиц ($^{\circ}\text{C}$); T_{opt} – 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), описывает 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 [18]:

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

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. Накопление тепловых единиц не начинается до тех пор, пока не наступит предельная аккумуляция единиц охлаждения для завершения органического покоя. Описание модели M2 [19]:

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

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

$$\text{и } Sf_{t_2} = F^* = \beta e^{\gamma S_{c_{t_1}}}, \quad (4)$$

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.

М3 – также последовательная CF, суммы накопления единиц охлаждения рассчитываются по уравнению (2), а соотношение между состоянием внешнего воздействия и состоянием охлаждения – по уравнению (4). Уравнение (4) – модифицированное продолжение модели М1 с накоплением свето-термальных единиц, учитывающих влияние фотопериода (DL) на развитие растений [20]:

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

Этот подход имеет некоторое преимущество, особенно если модель используется для выяснения возможных изменений в сроках фенологических событий из-за изменения климата. Константа 10 в знаменателе – параметр нормирования, применяющийся для сопоставимости рассчитанных Sf_i значений с исходными данными. Модель М3 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.

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 инструментом для решений хороших, близких к оптимальным сложных проблем для «негладких» функций [23].

Сравнение точности аппроксимации моделей осуществляли при помощи 4 индексов: коэффициента детерминации (R^2), корня из среднеквадратичной ошибки (Root Mean Squared Error – $RMSE$), скорректированного информационного критерия Акаике (AIC_c) и смещения ($Bias - \theta$):

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

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

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

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

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.

Для прогнозирования возможных сдвигов весеннего развития растений при изменении климата использованы результаты расчетов в рамках международного проекта CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5) [24]. В проекте CMIP5 используется прогнозный набор эмиссий по четырем сценариям, известным как Репрезентативные Траектории Концентраций (RCP), связанные со стабилизацией общего антропогенного воздействия в 2100 году на разных уровнях: 2.6, 4.5, и 8.5 Вт/м². Цифры обозначают приращение глобального радиационного баланса (Вт/м²) с доиндустриального периода до 2100 г., обусловленное соответствующими эмиссиями парниковых газов (ПГ). Из набора сценариев для характеристики будущих климатических изменений чаще всего используются RCP4.5 и RCP8.5. Как по совокупности допущений, так и по соответствию реальности первых лет прогноза наиболее реалистичным был определен RCP4.5.

Суточные данные метеовеличин за исторический период (1980–2005 гг.) и результаты климатического моделирования CMIP5 (2015–2099 гг.) были предоставлены Международным центром по тропическому сельскому хозяйству (CIAT) и Исследовательской программой КГМСХИ по изменению климата, сельскому хозяйству и продовольственной безопасности (CCAFS) [25]. 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 хорошо воспроизводящих тренды среднегодовой и сезонных температур, а также суммы температур выше 0 °С для территории Крыма [26].

По сценарию RCP4.5 к концу XXI века, относительно 1981-2000 гг. на ЮБК ожидается следующий рост средних месячных температур: января – на 2,3 °С; февраля – на 2,1 °С; марта – на 2,2 °С; апреля – на 2,4 °С; мая – на 2,5 °С; июня – на 2,8 °С; июля – на 3,0 °С; августа – на 3,1 °С; сентября – на 2,9 °С; октября – на 2,7 °С; ноября – на 2,4 °С и декабря – на 1,9 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании фенологических данных, для сирени, шиповника и липы рассчитаны средние даты разворачивания первых листьев и начала цветения в условиях Южного берега Крыма. Расчеты выполнены за весь период наблюдений с 1937 по 2017 годы (для шиповника – за 1947–2017 гг.), а также за отдельные отрезки в течение этого временного интервала с целью оценки фенологического отклика на существенные изменения в термическом режиме последних десятилетий (табл. 1). Для выявления связи наступления фенологических событий с устойчивым переходом средних суточных температур воздуха весной через определенный температурный порог, между ними дополнительно были рассчитаны коэффициенты парной корреляции.

Таблица 1
Фенологический отклик индикаторных видов растений на климатические изменения температурного режима Южного берега Крыма в 1937–2017 гг.

Показатель		Индикаторные виды растений					
		Сирень обыкновенная		Шиповник собачий		Липа сердцевидная	
		РЛ***	Ц****	РЛ***	Ц****	РЛ***	Ц****
Средняя дата за период	1937–2017 гг.*	10.IV±11	6.V±7	3.IV±13	24.V±8	27.IV±8	22.VI±10
	1961–1990 гг.	9.IV±9	4.V±8	4.IV±10	23.V±8	28.IV±8	25.VI±9
	1991–2017 гг.	11.IV±12	4.V±7	2.IV±16	23.V±8	27.IV±9	17.VI±8
	2001–2017 гг.	6.IV±11	4.V±8	29.III±13	21.V±7	25.IV±7	15.VI±7
Зависимость (r**) весеннего развития от устойчивого перехода температуры воздуха через порог:	5 °С	0,42	0,46	0,61	0,44	0,38	0,28
	6 °С	0,53	0,62	0,64	0,49	0,47	0,23
	7 °С	0,52	0,56	0,50	0,50	0,50	0,26
	8 °С	0,40	0,61	0,30	0,54	0,50	0,40
	9 °С	0,41	0,68	0,30	0,67	0,57	0,34
	10 °С	0,37	0,70	0,22****	0,56	0,58	0,29

* – для шиповника период наблюдений составляет 1947–2017 гг.; *r – коэффициент парной корреляции; **РЛ – дата разворачивания первых листьев; ***Ц – дата начала цветения; **** – коэффициент корреляции не значим на 5 % уровне

Полученные результаты показали, что за период с 1937 по 2017 годов у сирени и шиповника были относительно стабильные средние показатели сроков разворачивания первых листьев за весь период наблюдений и в течение XX века. Максимальный фенологический отклик наблюдался в первые десятилетия XXI века, когда произошел существенный их сдвиг на более ранние сроки: у сирени – на

4 дня, у шиповника – на 6 дней. При этом отмеченное смещение средних дат зацветания в два раза меньше: сирени – только на 2 дня, а шиповника – на 3 дня. У липы максимальный фенологический отклик на изменение температурного режима также проявился в XXI веке, но несколько иначе. Средняя дата развертывания первых листьев, которая отмечается в последней декаде апреля, изменилась незначительно – всего на 2 дня, а вот цветение – на неделю. Произшедшие сдвиги в весеннем развитии хорошо согласуются с результатами детальных исследований на Южном берегу Крыма динамики временных границ климатических сезонов, проведенных нами ранее [27]. Значительное повышение среднесуточных температур воздуха после 2000 года в марте и в начале апреля ускорило ранневесенние процессы развития растений, что нашло отклик в более ранних сроках развертывания листьев у сирени и шиповника. В то же время, даты устойчивого перехода температур через 10 °С, приходящиеся на третью пентаду апреля и характеризующие период активной вегетации, отличались наибольшей стабильностью. Несущественно изменились и сроки перехода температур через 15 °С, символизирующие наступление фенологического лета, климатическая норма которого приходится в Никитском саду на 13 мая. Как результат, относительная стабильность в сроках цветения сирени и шиповника, а также развертывания листьев у липы. В первые десятилетия XXI века произошел значительный отрицательный сдвиг (почти на 10 дней) начала самой теплой части летнего периода со среднесуточными температурами воздуха выше 20 °С, что нашло отражение в смещении сроков зацветания липы на 7 дней. Нельзя не отметить, что даты весеннего перехода среднесуточной температуры воздуха через 5 °С, являющиеся границами активного развития большинства дикорастущих видов, характеризуются на ЮБК наибольшей вариабельностью, что нашло фенологический отклик в самой высокой изменчивости дат развертывания листьев у сирени и шиповника (табл. 1). Полученные результаты позволяют констатировать, что максимальные значения фенологического отклика соответствуют максимальным изменениям термического режима, т.е. растения очень чутко реагируют на существующие температурные изменения.

Оптимизированные наборы параметров моделей, обеспечивающие прогноз дат развертывания первых листьев и начала цветения для сирени, шиповника и липы представлены в таблицах 2–4. При прогнозировании даты развертывания первых листьев для всех исследуемых видов наибольшую разницу в значениях RMSE между периодом параметризации моделей и периодом валидации показали модели M1 и M2 (до 4,4 и 2,9 дней соответственно). Величины RMSE были довольно высокими и достигали при валидации фенологических моделей сирени и шиповника 9–11 дней. Оценка качества моделей для прогнозирования сроков развертывания листьев показала наличие систематически большего, по сравнению с моделями M1 и M3, смещения (до 6,3 дней у сирени, табл. 2) при расчетах по модели M2. Значение R-квадрата (коэффициент детерминации) является индикатором степени подгонки модели к исходным данным. Аппроксимация моделью M3 дат развертывания первых листьев у исследуемых видов растений преимущественно дает более точные прогнозы, чем моделями M2 и M1 (табл. 2, 4).

Несмотря на самое большое количество параметров ($k=6$), наиболее точное ($RMSE=5,2$) и эффективное ($AIC_c=123,8$) прогнозирование даты развертывания листьев у липы (табл. 4), согласно большинству индексов оценки качества, показала модель М3, учитывающая воздействие фотопериода на фенологическое развитие.

При прогнозировании зацветания растений различие между значениями $RMSE$ не превышало 1,5 дня. Величины $RMSE$ фенологических моделей прогноза даты цветения значительно ниже, чем прогноза даты развертывания листьев. Межгодовую изменчивость сроков начала цветения сирени лучше описывают модели М2 и М3, охватывающие периоды и органического и вынужденного покоя и объясняющие от 79 до 86 % дисперсии переменной (табл. 2). При $k=5$ и $k=6$, они показали наиболее точное ($RMSE=2,9-3,5$ дней) и эффективное ($AIC_c=97,2$ и $115,7$) прогнозирование даты цветения сирени. Эти же модели показали и наименьшую величину смещения между наблюдаемыми и прогнозируемыми значениями. Для прогноза цветения шиповника лучшими по всем критериям оценки оказались модели М1 и М3 (табл. 3). Относительно низкие значения результатов моделирования оказались при прогнозировании сроков цветения липы. Максимальный коэффициент детерминации ($R^2=0,47$) был получен при расчетах по модели М3 (табл. 4).

Таблица 2
Параметры моделей прогнозов дат распускания первых листьев и начала цветения сирени обыкновенной на Южном берегу Крыма

Параметр		Фенологическая фаза развития					
		Развертывание первых листьев			Начало цветения		
		Фенологическая модель			Фенологическая модель		
		М1	М2	М3	М1	М2	М3
t_0 , дата			01.11	01.11		01.11	01.11
T_b , °С		0,0	6,3	4,0	0,0	6,1	4,3
F^* , °С		490,4	27,8	279,0	764,1	113,5	341,6
T_{opt} , °С			5,8	2,4		5,4	3,4
C^* , °С			58,4	14,6		34,1	31,8
t_1 , дата		01.01	24.12	13.12	01.01	17.01	09.01
β			116,929	419,590		176,846	547,593
γ			-0,0251	-0,0280		-0,0130	-0,0149
c				1,6987			0,0452
Результаты внутренней проверки	R^2	0,52	0,58	0,60	0,56	0,86	0,79
	RMSE, дни	7,6	7,9	6,8	5,3	2,9	3,5
	AIC_c	136,8	144,2	138,1	140,7	97,2	115,7
	θ , дни	0,5	-3,1	-1,8	1,2	0,8	-0,5
Результаты валидации	R^2	0,40	0,41	0,42	0,64	0,83	0,81
	RMSE, дни	10,3	10,8	9,1	5,6	3,5	3,7
	θ , дни	-3,7	-6,3	-4,7	-0,7	0,6	-1,1

Таблица 3

Параметры моделей прогнозов дат распускания первых листьев и начала цветения шиповника собачьего на Южном берегу Крыма

Параметр		Фенологическая фаза развития					
		Развертывание первых листьев			Начало цветения		
		Фенологическая модель			Фенологическая модель		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3
t_0 , дата		01.01	01.11	01.11	29.01	01.11	01.11
T_b , °C		0,0	5,3	4,6	0,0	8,3	4,0
F^* , °C		429,2	45,0	103,9	971,4	68,6	575,1
T_{opt} , °C			5,0	4,5		7,6	4,0
C^* , °C			29,3	28,6		32,8	26,9
$t1$, дата			16.12	15.12		27.01	09.01
β			127,394	343,852		121,714	854,289
γ			-0,0355	-0,0412		-0,0159	-0,0148
c				0,2014			0,0035
Результаты внутренней проверки	R^2	0,78	0,81	0,80	0,73	0,59	0,74
	RMSE, дни	6,3	6,5	7,0	4,9	5,6	5,0
	AIC_c	124,2	132,3	139,7	121,0	136,2	130,9
	θ , дни	-0,1	2,3	1,3	-0,1	1,8	0,5
Результаты валидации	R^2	0,41	0,61	0,60	0,68	0,54	0,71
	RMSE, дни	10,7	9,4	9,3	4,6	6,6	4,3
	θ , дни	-2,1	1,7	1,0	-1,2	2,3	-0,2

Тестирование фенологических моделей показало, что как для 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. 2–4). В целом, точность прогноза используемых моделей для фенофазы начала цветения была выше, чем для фазы развертывания первых листьев (за исключением липы). Значения показателя значимости фотопериода у сирени указывают на высокую фотопериодическую чувствительность фазы развертывания листьев и почти нейтральную – цветения (табл. 2). Величины показателя значимости фотопериода (табл. 3–4) у шиповника и липы позволяют предположить, что у этих видов фотопериодически более чувствительна фенологическая фаза развертывания листьев, чем цветения. Таким образом, для прогнозирования на Южном берегу Крыма сроков весенней вегетации сирени, шиповника и липы лучшей моделью является модель М3, охватывающая оба периода покоя растения, и органического и вынужденного, учитывающая при этом воздействие фотопериода. Данная модель предполагает, что внешнее

воздействие температур на развитие почки не будет иметь результата до тех пор, пока не будет обеспечена предельная аккумуляция единиц охлаждения для завершения органического покоя.

По итогам проведенного тестирования для прогнозирования возможных изменений сроков весеннего развития растений в будущих климатических условиях была выбрана фенологическая модель М3. Входными данными модели являлись среднесуточные величины температур 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 климатическим сценариям RCP4.5 и RCP4.5 были построены проекции согласованных изменений климата и весенней фенологии *S. vulgaris*, *R. canina* и *T. cordata* на 2021–2099 гг. Для осредненных по 20-летиям периодов с 1937 по 2099 гг. были рассчитаны аномалии дат разворачивания первых листьев и начала цветения по отношению к периоду 1981–2000 гг., принятого базовым (рис. 1).

Таблица 4

Параметры моделей прогнозов дат распускания первых листьев и начала цветения липы сердцевидной на Южном берегу Крыма

Параметр		Фенологическая фаза развития					
		Разворачивание первых листьев			Начало цветения		
		Фенологическая модель			Фенологическая модель		
		М1	М2	М3	М1	М2	М3
t_0 , дата		03.01	01.11	01.11	01.1	01.11	01.11
T_b , °C		0,0	6,3	4,1	0,0	9,7	4,0
F^* , °C		665,8	72,7	27,2	1617,1	217,0	993,1
T_{opt} , °C			6,3	3,5		9,6	2,7
C^* , °C			43,0	34,6		32,9	38,2
t_1 , дата			31.01	01.02		31.12	17.02
β			156,400	499,092		375,968	1606,905
γ			-0,0180	-0,0177		-0,0168	-0,0126
c				0,3809			0,1551
Результаты внутренней проверки	R^2	0,41	0,62	0,65	0,24	0,32	0,47
	RMSE, дни	6,2	7,0	5,2	8,6	8,4	7,2
	AIC_c	126,9	140,6	123,8	178,4	182,1	172,9
	θ , дни	0,5	3,4	1,5	-0,5	2,4	1,4
Результаты валидации	R^2	0,27	0,40	0,36	0,18	0,28	0,35
	RMSE, дни	7,9	7,6	7,1	9,4	9,0	8,4
	θ , дни	-1,5	2,5	0,9	-0,1	3,2	2,4

Результаты расчетов показали, что для различных климатических сценариев проявилась различная фенологическая реакция растений на прогнозируемый рост

температур в течение XXI столетия. При реализации сценария RCP4.5 (рис. 1 А, В) в ближайшие 20 лет по сравнению с последним временным периодом 2001–2017 годов при сохранении относительной стабильности сроков цветения (рис. 1 В) ожидается смещение на более поздние сроки (на 9–11 дней) дат разворачивания первых листьев у сирени и шиповника (рис. 1 А). Изменений дат наступления весенних фенофаз у липы не ожидается. С 30-х годов до конца столетия у рассматриваемых видов предполагается синхронное последовательное смещение на более ранние сроки, как разворачивания листьев, так и начала цветения. К концу столетия временные сроки облиствения сохранятся на уровне первых десятилетий XXI столетия, а цветение будет наступать на неделю раньше (приблизительно на 7–8 дней).

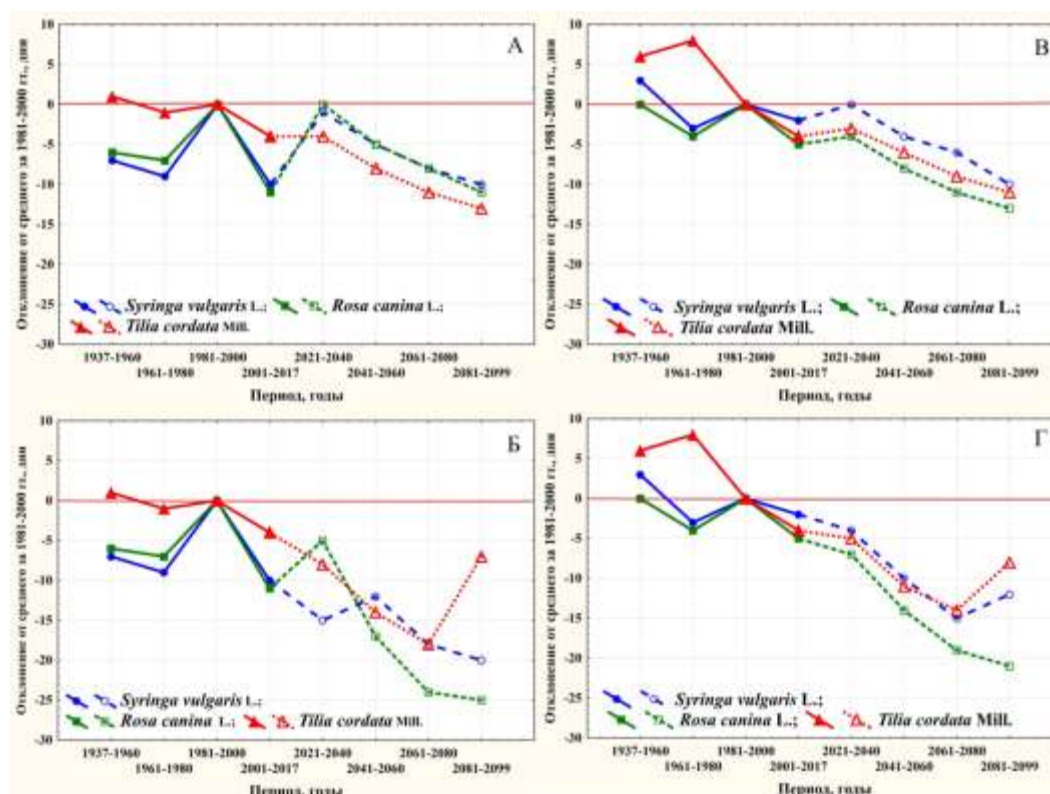


Рис. 1. Наблюдаемые (сплошные линии) и прогнозируемые (пунктирные линии) аномалии дат разворачивания первых листьев (А–Б) и начала цветения (В–Г) растений-феноиндикаторов на Южном берегу Крыма при климатических сценариях RCP4.5 (А, В) и RCP8.5 (Б, Г) по отношению к базовому периоду за 1981–2000 годы (базовый период: дата разворачивания первых листьев (начало цветения): *S. vulgaris* – 16.04 (06.05); *R. canina* – 09.04 (26.05); *T. cordata* – 29.04 (19.06)).

При реализации жесткого сценария RCP8.5 у исследуемых видов по результатам моделирования проявились различные реакции на интенсивное повышение температур, особенно в сроках разворачивания первых листьев. Для сирени было сохранение тенденции, установившейся с конца XX столетия. По сценарию RCP8.5 предполагаются более поздние сроки облиствения шиповника в первой половине, а липы – конце столетия. Продолжится начавшееся в конце XX столетия смещение на более ранние сроки начала цветения. После 60-х годов скорость смещения увеличится. Из-за интенсивного роста температур, в последней четверти столетия необходимые для окончания периода органического покоя сирени и липы суммы единиц охлаждения не смогут накопиться за зимний период. Можно предположить, что недостаточные условия охлаждения будут компенсированы удлинением фотопериодом. В связи с этим, в конце XXI века существует вероятность сдвига начальных фаз вегетации у некоторых древесно-кустарниковых видов растений на более поздние даты. Например, в 2081–2099 годах его величина может достигать 10 дней при облиствении липы и 3–6 дней при зацветании сирени и липы (рис. 1 Б, Г). В то же время для шиповника сдвиги весенней фенологии не предполагаются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Положительная температурная чувствительность, полученная для *Syringa vulgaris* L., *Rosa canina* L. и *Tilia cordata* Mill. позволяет наиболее обоснованно использовать эти виды в условиях изменения климата для региональной оценки состояния экосистемы не только Южного берега Крыма, но и всего Крымского полуострова. Для прогнозирования сроков их весенней вегетации лучшей моделью оказалась модель МЗ, охватывающая периоды органического и вынужденного покоя растений и учитывающая воздействие фотопериода.

Реакция феноиндикаторов на ожидаемые изменения термического режима позволяет сделать заключение, что при реализации наиболее вероятного сценария RCP4.5 в ближайшие 10–20 лет в начале весны значительного повышения температур на Южном берегу Крыма не ожидается. В связи с этим опасность повреждения вегетирующих растений поздними весенними заморозками сохранится. Не предполагается в ближайшее время и смещения на более ранние сроки наступления фенологического лета. В период с 30-х до 60-х годов XXI века, в связи с ростом температур, границы фенологических сезонов будут постепенно смещаться на более ранние сроки со средней скоростью около 2–4 дней за 10 лет. В конце XXI века ожидается увеличение темпов их смещения до 5–6 дней за 10 лет. При реализации самого неблагоприятного сценария RCP8.5 к концу столетия скорость смещения может достигнуть 8–11 дней за 10 лет.

Для успешного прогнозирования сроков весеннего развития в условиях изменения климата необходима дальнейшая разработка фенологических моделей. Анализ коэффициентов корреляции между устойчивыми переходами температур через различные пороговые значения указывает на статистически значимую связь фенологического события с переходом температур через определенную градацию, причем в зависимости от фазы развития и вида растения эти показатели различны. Таким образом, при использовании фенологических моделей для прогнозирования

сроков весеннего развития с целью оценки возможного из смещения в условиях изменения климата, представляется более целесообразным в качестве привязки для начала расчетов использовать не фиксированные даты, а даты устойчивого перехода температур, которые будут изменяться синхронно с изменением климата. Обязательным условием при этом является соблюдение единства методики при определении дат устойчивого перехода.

Данная работа дополняет результаты фенологического мониторинга для деревьев и кустарников по Европейской и Азиатской части территории России, а также по Северному полушарию.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает признательность начальнику агрометеорологической станции Никитский сад ФГБУ «Крымское УГМС» П. Б. Корсакову за помощь при обработке фенологических данных и данных моделирования СМIP5.

Список литературы

1. Wolkovich E. M. Warming experiments under predict plant phenological responses to climate change / E. M. Wolkovich, B. I. Cook, J. M. Allen et al. // Nature. – 2012. – Vol. 485. – P. 494–497.
2. Ненашева Г. И. Феноиндикаторы геосистемы Северо-Восточного Алтая / Г. И. Ненашева, Н. С. Малыгина, Е. Ю. Митрофанова [и др.] // Известия АлтГУ. – 2014. – Т. 2, № 3(83). – С. 129–133.
3. Cleland E. E. Shifting plant phenology in response to global change / E. E. Cleland, I. Chuine, A. Menzel [et al.] // Trends in Ecology and Evolution. – 2007. – Vol. 22, No. 7. – P. 357–365.
4. Parmesan C. Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming / C. Parmesan // Global Change Biology. – 2007. – Vol. 13. – P. 1860–1872.
5. Минин А. А. Фенология русской равнины: материалы и обобщения / А. А. Минин. – М.: Изд-во АБФ/АБФ, 2000. – 160 с.
6. Минин А. А. Феноиндикация изменений климата за период 1976-2015 гг. в центральной части Европейской территории России: береза бородавчатая (повислая) (*Betula verrucosa* Ehrh. (*B. Pendula* Roth.)) / А. А. Минин, Э. Я. Ранькова, Е. Г. Рыбина [и др.] – Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2016. – Т. 27, № 2. – С. 17–28.
7. Menzel A. European phenological response to climate change matches the warming pattern / A. Menzel, T. H. Sparks, N. Estrella [et al.] // Global Change Biol. – 2006. – Vol. 12. – P. 1969–1976.
8. Sherry R. A. Divergence of reproductive phenology under climate warming / R. A. Sherry, X. Zhou, S. Gu [et al.] // Proc. Nat. Acad. Sci. – 2007. – Vol. 104. – P. 198–202.
9. Жмылёва А. П. Фенологическая реакция лесных растений на потепление климата: рано- и поздноцветущие виды / А. П. Жмылёва, Е. А. Карпухина, П. Ю. Жмылёв // Вестник РУДН, серия Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 2. – С. 5–15.
10. Primack R. B. Spatial and interspecific variability in phenological responses to warming temperatures / R. B. Primack, I. Ibáñez, H. Higuchi [et al.] // Biological Conservation. – 2009. – 142. – P. 2569–2577.
11. Карпухина Е. А. Зимний покой и весеннее распускание почек лесных растений / Е. А. Карпухина, П. Ю. Жмылёв, А. П. Жмылёва // Вестник РУДН. Серия «Экология и безопасность жизнедеятельности». – 2007. – № 1. – С. 5–11.
12. Franks S. J. Evolutionary and plastic responses to climate change in terrestrial plant populations / S. J. Franks, J. J. Weber, S. N. Aitken // Evol. Appl. – 2014. – Vol. 7. – 123–139.
13. Аэроландшафтно-индикационные методы при региональных инженерно-геологических исследованиях / Под ред. С. В. Викторова, А. В. Садова. – М.: Недра, 1981. – 203 с.
14. Буторина Т. Н. Биоклиматическое районирование Красноярского края / Т. Н. Буторина. – Новосибирск, «Наука», 1979 – 231 с.

15. Синельникова Н. В. Сезонная жизнь природы Верхней Колымы / Н. В. Синельникова, М. Н. Пахомов. – Москва, Товарищество научных изданий КМК, 2015. – 329 с.
16. Гордеев А. В. Биоклиматический потенциал России: теория и практика / А. В. Гордеев, А. Д. Клещенко, Б. А. Черняков [и др.]. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. – 512 с.
17. Ruml M. Importance of phenological observations and predictions in agriculture / M. Ruml, T. Vulić // *Journal of Agricultural Sciences*. – 2005. – Vol. 50, No 2. – P. 217–225.
18. Chuine I. Plant development models. In: *Phenology: an integrative environmental science* / I. Chuine, K. Kramer, H. Hänninen. – 2003. – 1st edn. Ed. M.D. Schwartz (Kluwer Press: Milwaukee, WI). – P. 217–235.
19. Hänninen H. Modelling bud dormancy release in trees from cool and temperate regions / H. Hänninen // *Acta Forestalia Fennica*. – 1990. – Vol. 213. – P. 1–47.
20. Blümel K. Shortcomings of classical phenological forcing models and a way to overcome them / K. Blümel, F. M. Chmielewski // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2012. – Vol. 164. – P. 10–19.
21. Плугатарь Ю. В. Экологический мониторинг Южного берега Крыма / Ю. В. Плугатарь, С. П. Корсакова, О. А. Ильницкий. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2015. – 164 с.
22. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 11. Агрометеорологические наблюдения на станциях и постах. Ч. 1. Основные агрометеорологические наблюдения. – Л.: Гидрометеоиздат, – 1985. – 316 с.
23. Winston W. L. *Practical Management Science*, 6E, geared entirely to Excel 2016 / W. L. Winston, S. CH. Albright. – Cengage Learning, 2018. – 50 p.
24. 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 [et al.]. – 2013, Cambridge, UK: Cambridge University Press. – 1535 p.
25. Ramirez J. High resolution statistically downscaled future climate surfaces. International Center for Tropical Agriculture (CIAT); CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS) / J. Ramirez, A. Jarvis. 2008. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ccafs-climate.org/data/> (дата обращения: 7.02.2018, 4.07.2018).
26. Анисимов О. А. Об оптимальном выборе гидродинамических моделей для оценки влияния изменений климата на криосферу / О. А. Анисимов, В. А. Кокорев // *Лед и Снег*. – 2013. – Т. 121. – № 1. – С. 83–92.
27. Корсакова С. П. Динамика временных границ климатических сезонов на Южном берегу Крыма в условиях изменения климата / С. П. Корсакова, П. Б. Корсаков // *Бюллетень ГНБС*. – 2018. – № 127. – С. 107–115.

RESPONSE OF PHENOINDICATORS TEMPERATE CLIMATE TO THE CLIMATE CHANGE IN DRY SUBTROPICAL: MODELING AND FORECASTING

Korsakova S. P.

The Nikita Botanical Gardens – National Scientific Center RAS, Yalta, Russia
E-mail: korsakova2002@mail.ru

Analysis and predicting species' responses to climate change are currently major challenge in ecology. As objects for systematic observations to assess and predict the state of the geosystem using indicator plant species – phenological indicators. Phenological models are the basic tools linking the occurrence of phenological events, such as leaf unfolding, flowering, or maturing of fruits with climatic factors. In this investigation three phenological models were examined with respect to their suitability to predict timing terms of leaf unfolding, beginning of flowering and to estimate possible future phenological shifts in the spring due to climate change. Used long-term in situ phenology

observations collected in dry subtropics of the Southern coast of the Crimea for three plant species *Syringa vulgaris* L., *Rosa canina* L. and *Tilia cordata* Mill. which are phen indicators plants. 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 for the chilling–forcing models was set to 1 November. Phenological observations from 1937 to 2017 and temperature data in the period 1936–2017 were used to fit these models. The starting date of temperature accumulation, base temperature and the forcing requirements were optimized on the basis of observed data. Testing of phenological models showed highly relevant to simulate leaf unfolding and beginning of flowering dates for species by M3 model integrating a photoperiod cue. This model together with meteorological projections based on two climate change scenarios CMIP5 project (RCP4.5 and RCP8.5) were used to estimate *S. vulgaris*, *R. canina* and *T. cordata* leaf unfolding and beginning of flowering dates along the 21st Century. In species-specific projections of phenological responses to climate warming it can be concluded that if the implementation of the most realistic RCP4.5 scenario during of the next 10–20 years in early spring, a significant increase in temperature on the Southern coast of the Crimea is not expected. In this regard, the frost risk damage to plants by frosts in late spring will continue. It is not expected in the near future shifting to an earlier date of phenological summer occurrence. During period from the 30s to 60s of the XXI century due to the temperatures increase the boundaries of phenological seasons will gradually shift to earlier time with an average speed of about 2–4 days in 10 years. At the end of the XXI century it is expected to increase the rate of shifting these boundaries to 5–6 days in 10 years. When implementing the most adverse scenario RCP8.5 by the end of the century the rate of shifting plants phenology in response to climate warming can increase to 8–11 days in 10 years. 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. Future studies are needed to understand of the complex physiology that controls chilling and forcing of plants phenology more accurately.

Keywords: phenological models; Climate change; leaf unfolding; flowering; Southern coast of the Crimea.

References

1. Wolkovich E. M., Cook B. I., Allen J. M. [et al.] Warming experiments under predict plant phenological responses to climate change, *Nature*, **485**, 494 (2012).
2. Nenasheva G. I., Malygina N. S., Mitrofanova E. Y., Lovtskaya O. V., Ryabchinskaya N. A., Sokolov A. V., Chukhontseva S. V., Sakhnevuch M. B. and Koroleva E. F. Phen indicators of the North-Eastern Altai Geosystem, *Izvestiya of Altai State University*, **2**(3(83)), 129 (2014).
3. Cleland E. E., Chuine I., Menzel A., Mooney H. A. and Schwartz M. D. Shifting plant phenology in response to global change, *Trends in Ecology and Evolution*, **22**(7), 357 (2007).
4. Parmesan C. Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming, *Global Change Biology*, **13**, 1860 (2007).
5. Minin A. A. *Phenology of the Russian plain: materials and generalizations*, 160 p. (M: ABF, 2000).
6. Minin A. A., Rankova E. Ya., Rybina E. G., Buyvolov Yu. A., Sapel'nikova I. I. and Filatova T. D. Phen indicators of climate change for the period 1976–2015 in the central part of European Russia: common birch (silver birch) (*Betula verrucosa* Ehrh. (*B. pendula* Rroth.)), bird cherry (*Padus avium* Mill.),

- mountain ash (rowan) (*Sorbus aucuparia* L.), small-leaves lime (linden) (*Tilia cordata* Mill.), *Problems of ecological monitoring and ecosystem modeling*, **27**(2), 17 (2017).
7. Menzel A., Sparks T. H., Estrella N., Koch E., Aasa A., Ahas R., Alm-Kübler K., Bissolli P., Braslavská O., Briede A. [et al.] European phenological response to climate change matches the warming pattern, *Global Change Biol*, **12**, 1969 (2006).
 8. Sherry R. A., Zhou X., Gu S., Arnone J. A., Schimel D. S., Verburg P. S., Wallace L. L. and Luo Y. Divergence of reproductive phenology under climate warming, *Proc. Nat. Acad. Sci*, **104**, 198 (2007).
 9. Zhmyleva A. P., Karpukhina E. A., Zhmylev P. Ju. Influence of climate warming on flowering time of early and lately flowering forest plants, *Vestnik RUDN, series Ecology and life safety*, **2**, 5, (2011).
 10. Primack R. B., Ibáñez I., Higuchi H., Lee S. D., Miller-Rushing A. J., Wilson A. M. and Silander J. A. Spatial and interspecific variability in phenological responses to warming temperatures. *Biological Conservation*, **142**, 2569 (2009).
 11. Karpukhina E. A., Zhmylev P. Ju and Zhmyleva A. P. Forest plants winter dormancy and spring budburst, *Vestnik RUDN, series Ecology and life safety*, **1**, 5 (2007).
 12. Franks S. J., Weber J. J. and Aitken S. N. Evolutionary and plastic responses to climate change in terrestrial plant populations, *Evolution Appl*, **7**, 123 (2014).
 13. *Eurolandscape-indication methods in regional engineering-geological studies*, Viktorov S. V. and Sadovoy A. V. (Ed.), 203 p. (Moscow, 1981).
 14. Butorina T. N. *Bioclimatic zoning of Krasnoyarsk region*, 231 p. (Novosibirsk, Nauka, 1979)
 15. Pakhomov M. N. *Seasonal life of nature in the Upper Kolyma region*, 329 p. (Moscow: KMK Scientific Press, 2015).
 16. Gordeev A. V., Kleschenko A. D., Chernyakov B. A. and Sirotenko O. D. Bioclimatic potential of Russia: theory and practice, 512 p. (Tovarischestvo nauchnykh izdaniy KMK, Moscow, 2006).
 17. Ruml M. and Vulić T., Importance of phenological observations and predictions in agriculture, *Journal of Agricultural Sciences*, **50**(2), 217 (2005).
 18. Chuine I., Kramer K. and Hänninen H. Plant development models. In: Phenology: an integrative environmental science, *1st edn. Ed. M.D. Schwartz (Kluwer Press: Milwaukee, WI)*, **217** (2003).
 19. Hänninen H. Modelling bud dormancy release in trees from cool and temperate regions, *Acta Forestalia Fennica*, **213**, 1 (1990).
 20. Blümel K. and Chmielewski F. M. Shortcomings of classical phenological forcing models and a way to overcome them, *Agricultural and Forest Meteorology*, **164**, 10 (2012).
 21. Plugatar Yu. V., Korsakova S. P. and Il'nitsky O. A. *Ecological monitoring of the Southern Coast of the Crimea*, 164 p. (Simferopol: PP "ARIAL", 2015).
 22. *Instruction to hydrometeorological stations and posts. Issue. 11. Agrometeorological observations at stations and posts. Part 1. Basic agrometeorological observations*, 316 p. (L.: Gidrometeoizdat, 1985).
 23. Winston W. L. and Albright S. CH. *Practical Management Science, 6E, geared entirely to Excel 2016*, 50 p. (Cengage Learning, 2018).
 24. 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, 1535 p. (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013).
 25. Ramirez J. and 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, 2018 [Electronic resource]. Access point: <http://ccafs-climate.org/data/> (reference's date – 7.02.2018, 4.07.2018).*
 26. Anisimov O. A. and Kokorev V. A. On the optimal choice of hydrodynamic models for assessing the impact of climate change on the cryosphere, *Ice and Snow*, **121**(1), 83 (2013).
 27. Korsakova S. P. and Korsakov P. B. Dynamics in the temporal boundaries of climatic seasons in the Southern Coast of the Crimea under climate change, *Bulletin of the State Nikita Botanical Gardens*, **127**, 107 (2018).