

Моделирование фенологического отклика травянистых растений на изменение климата в Западной Сибири

Фомин Э.^{1*}, Фомина Т.²

¹ Институт цитологии и генетики СО РАН, Новосибирск, Россия

² Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, Новосибирск, Россия

* fomin@bionet.nsc.ru

Ключевые слова: модели фенологического развития; метеорологические и фенологические тренды; травянистые однолетники; Западная Сибирь

Мотивация и цель: Фенология растений является одним из надежных биоиндикаторов глобального изменения климата [1]. Многочисленные исследования в умеренных экосистемах Северного полушария согласуются с ожидаемыми смещениями фаз развития в соответствии с трендами изменения температуры [2]. При этом отмечается не только высокая вариабельность смещений фенологии в зависимости от региона, видового состава и прочих факторов [3], но и различная чувствительность видов и высокая контрастность реакций даже в пределах одного местообитания [4, 5].

Доступные в Интернете базы данных фенологических событий из-за многообразия сезонных проявлений развития и зачастую слабой их выраженности не имеют достаточной полноты и охватывают преимущественно фрагментарные наблюдения за отдельные годы, интересные конкретным исследователям и коллективам. Такие базы данных подвержены человеческому фактору, имеют пропуски, случайные и систематические ошибки регистрации дат фенособытий, преимущественно в сторону запаздывания. Необходимые для анализа метеорологические данные в основном собираются приборами и существенно меньше подвержены человеческому фактору, хотя пространственная разделенность мест регистрации метео- и фенонаблюдений также вносит множество случайных ошибок.

Недостаточность фенологических данных не позволяет обучать нейронные сети общего назначения в силу переизбытка внутренних параметров относительно числа входных данных, и необходимо использовать более простые модели. Целью нашей работы является обработка накопленных за более чем 20-летний период данных наблюдений за фенологией травянистых многолетников и разработка малопараметрических моделей для прогноза фенологического развития растений.

Методы и алгоритмы: Фенологические наблюдения проводились в коллекции декоративных растений природной флоры Центрального сибирского ботанического сада (ЦСБС СО РАН) на 78 видах многолетников (55°2'29.4" с.ш., 82°56'4.6" в.д.). Массовый сбор данных осуществлялся в период 1996–2015 гг. Фенонаблюдения проводили регулярно, 2–3 раза в неделю, в течение всего сезона вегетации. Число особей разных видов различалось по годам, но на момент наблюдения было не менее 4–6 шт. особей зрелого генеративного состояния каждого вида.

Данные метеорологических (метеостанция Огурцово № 29638) и фенологических наблюдений обрабатывались стандартными методами с помощью пакетов PAST, MSeXcel, R и методом бутстрэппинга [6], реализованного собственным кодом на C++. Для разработки прогностических моделей развития используется Python. В основе таких моделей лежит короткая цепочка итерационных перцептронов, обучаемых на фенологических базах данных небольшого объема (рис. 1).

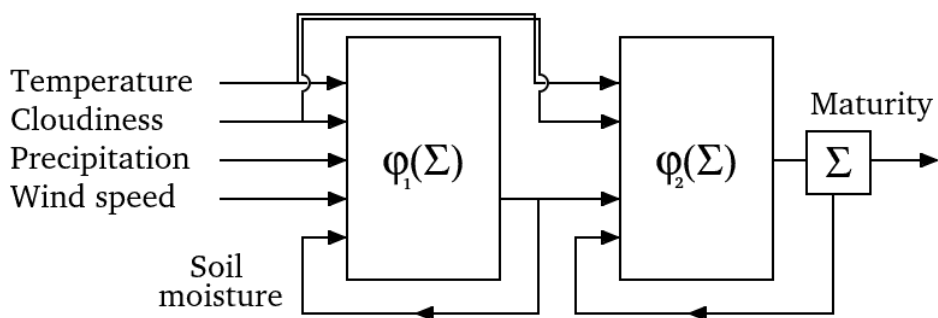


Рис. 1. Пример простейшей модели для прогноза одиночной фенофазы развития (ϕ_2). Модель дополнена персептроном (ϕ_1) для подмены параметра «осадки» на параметр «влажность почвы»

Результаты: Обработаны данные фенологических наблюдений 78 видов многолетних коллекций декоративных растений природной флоры ЦСБС СО РАН [7]. Получены результаты, указывающие направление изменений фенособытий для разных экологических групп [8] и разных жизненных форм [9] в условиях изменения климата для Западной Сибири. Для более точного и видового прогноза фенособытий «в режиме реального времени» предложена модель, основанная на цепи связанных итерационных персептронов. Модель позволяет подменять типы сумматоров (Σ) и функции активации (ϕ) компенсируя негибкость малопараметрических подходов. Один из возможных вариантов модели, построенный с использованием обобщенной линейной функции (ϕ) в условиях экспоненциального и линейного роста (Σ) опробован на данных статьи [10]. Получено, что модель качественно правильно прогнозирует отсутствие влияния осадков и влажности воздуха на урожайность риса («обнуление» связанных с данными параметрами входных данных) и рост/снижение урожайности с изменением продолжительности сезона.

Выводы: Разработаны программы для получения метеорологических и фенологических трендов и оценки их достоверности на основе метода бутстрэппинга. Предложены прогностические модели, способные обучаться на основе фенологических баз данных небольшого объема.

Финансирование: Исследование поддержано бюджетными проектами № FWNR-2022-0020 и AAAA-A21-121011290025-2. При подготовке статьи использовались материалы Биоресурсной научной коллекции ЦСБС СО РАН, УНУ «Коллекции живых растений в открытом и закрытом грунте», USU 44053.

Modeling the phenological response of herbaceous plants to climate change in Western Siberia

Fomin E.^{1*}, Fomina T.²

¹ Institute of Cytology and Genetics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

² Central Siberian Botanical Garden, SB RAS, Novosibirsk, Russia

* fomin@bionet.nsc.ru

Key words: models of phenological development; meteorological and phenological trends; herbaceous annuals; Western Siberia

Motivation and Aim: Plant phenology is one of the reliable bioindicators of global climate change [1]. Numerous studies in temperate ecosystems of the Northern Hemisphere are consistent with expected shifts in developmental phases in accordance with temperature trends [2]. At the same time, there is not only high variability in phenology shifts depending on the region, species composition and other factors [3], but also different sensitivity of species and high contrast of reactions even within the same habitat [4, 5]. Databases of phenological events available on the Internet, due to the diversity of seasonal manifestations of development and often their weak expression, are not sufficiently complete and cover mainly fragmentary observations for individual years that are interesting to specific researchers and teams. Such databases are subject to the human factor, have omissions, random and systematic errors in recording the dates of phenological events, mainly in the direction of lag. The meteorological data required for analysis is mainly collected by instruments and is significantly less susceptible to human error, although the spatial separation of places where meteorological and phenological observations are recorded also introduces many random errors.

The insufficiency of phenological data does not allow training general-purpose neural networks due to an overabundance of internal parameters relative to the number of input data, and it is necessary to use simpler models. The goal of our work is to process observational data accumulated over more than 20 years on the phenology of herbaceous perennials, and to develop low-parameter models for predicting the phenological development of plants.

Methods and Algorithms: Phenological observations were carried out in the collection of ornamental plants of the natural flora of the Central Siberian Botanical Garden (CSBS SB RAS) on 78 species of perennials (55°2'29.4" N, 82°56'4.6" E). Bulk data collection was carried out during the period 1996–2015. Phenomena observations were carried out regularly, 2–3 times a week, throughout the growing season. The number of individuals of different species varied by year, but at the time of observation there were at least 4–6 individuals in a mature generative state of each species. Data from meteorological (Ogurtsovo weather station No. 29638) and phenological observations were processed using standard methods using the PAST, MSExcel, R packages and the bootstrapping method [6], implemented with our own code in C++. Python was also used to develop development models. The predictive models currently being developed are based on a short chain of iterative perceptrons trained on small phenological databases (Fig. 1).

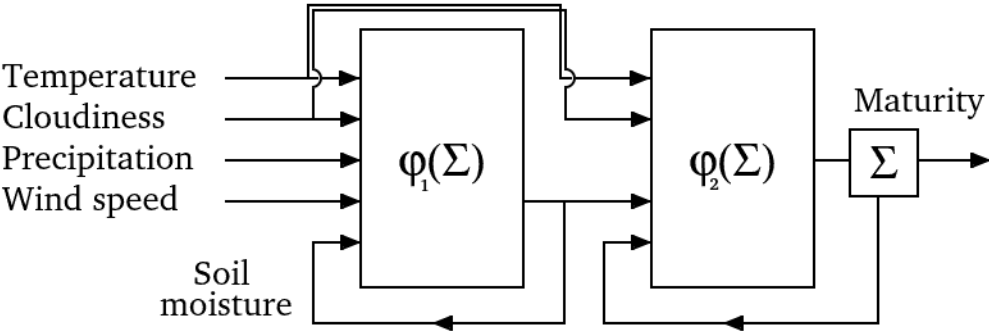


Fig. 1. An example of the simplest model for predicting a single phenophase of development (φ_2). The model is supplemented with a perceptron (φ_1) to replace the “precipitation” parameter with the “soil moisture” parameter

Results: Text Data from phenological observations of 78 species of perennials from the collection of ornamental plants of the natural flora of the Central Botanical Garden of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences were processed [7]. Results were obtained indicating the direction of changes in pheno-events for different ecological groups [8] and different life forms [9] under climate change conditions for Western Siberia. For a more accurate and specific prediction of pheno-events “in real time”, a model based on a chain of connected iterative perceptrons is proposed. The model allows you to change the types of adders (Σ) and activation functions (ϕ), compensating for the inflexibility of low-parameter approaches. One of the possible variants of the model, constructed using a generalized linear function (ϕ) under conditions of exponential and linear growth (Σ), was tested on the data of the article [10]. It was found that the model qualitatively correctly predicts the absence of the influence of precipitation and air humidity on rice yield (“zeroing” the input data associated with these parameters) and the increase/decrease in yield with changes in the length of the season.

Conclusion: Programs have been developed to obtain meteorological and phenological trends and assess their reliability based on the bootstrapping method. Predictive models are proposed that can be trained on the basis of small phenological databases.

Funding: The study was supported by budget projects No. FWNR-2022-0020 and AAAA-A21-121011290025-2. In preparing the article, materials from the Bioresource Scientific Collection of the Central Botanical Garden of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, UNU “Collections of living plants in open and closed ground”, USU 44053 were used.

Список литературы/References

1. Lippmann R., Babben S., Menger A., Delker C., Quint M. Development of wild and cultivated plants under global warming conditions. *Curr Biol.* 2019;29:1326-1338. doi 10.1016/j.cub.2019.10.016
2. Cleland E.E., Chuine I., Menzel A., Mooney H.A., Schwartz M.D. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends Ecol Evol.* 2007;22(7):357-365. doi 10.1016/j.tree.2007.04.003
3. Piao S., Liu Q., Chen A., Janssens I.A., Fu Y., Dai J., Liu L., Lian X., Shen M., Zhu X. Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Glob Chang Biol.* 2019;25:1922-1940. doi 10.1111/gcb.14619
4. Lehoczký A., Szabó B., Pongrácz R., Szentkirályi F. Testing plant phenophase as proxy: Sensitivity analysis of first flowering data from the 19th century. *Appl Ecol Environ Res.* 2016;14(2):213-233. doi 10.15666/aeer/1402_213233
5. Chmura H.E., Kharouba H.M., Ashander J., Ehlman S.M., Rivest E.B., Yang L.H. The mechanisms of phenology: the patterns and processes of phenological shifts. *Ecol Monogr.* 2019;89(1):e01337. doi 10.1002/ecm.1337
6. Efron B. Bootstrap methods: Another look at the jack-knife. *Ann Stat.* 1979;7(1):1-26. doi 10.1214/aos/1176344552
7. Fomin E.S., Fomina T.I. Changes in the Phenology of Perennial Plants in Western Siberia against the Background of Global Warming. *Contemp Probl Ecol.* 2021;14(5):434-445. doi 10.1134/S199542552105005X
8. Fomin E.S., Fomina T.I. Phenological Reactions of Perennial Plants to Climate Change in Western Siberia. *Contemp Probl Ecol.* 2023;16(6):698-707. doi 10.1134/S1995425523060070
9. Fomin E.S., Fomina T.I. Phenological Response of Plants of Different Biomorphs to Climate Change in Western Siberia. *Biol Bull.* 2024;51(3):565-575. doi 10.1134/S1062359023604445
10. Rebollo I., Scheffel S., Blanco P., Molina F., Martínez S., Carracelas G., Aguilar I., de Vida F.P., Rosas J.E. Consolidating 23 years of historical data from an irrigated subtropical rice breeding program in Uruguay. *Crop Sci.* 2023;63:1300-1315. doi 10.1002/csc2.20955