

УДК 551.586:551.582.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕЗОННЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ МОДЕЛИ INM-CM5 ДЛЯ ОЦЕНКИ СРОКОВ НАЧАЛА ПЫЛЕНИЯ БЕРЕЗЫ

© 2023 г. С. В. Емелина^{a, b, c, *}, В. М. Хан^{a, b, c}, В. А. Семенов^{c, d}, В. В. Воробьева^{a, b, c},
М. А. Тарасевич^{a, b, e}, Е. М. Володин^{a, b, c}

^aГидрометцентр России, Большой Предтеченский пер., 11–13, Москва, 123242 Россия

^bИнститут вычислительной математики РАН, ул. Губкина, 8, Москва, 119991 Россия

^cИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

^dИнститут географии РАН, Старомонетный пер., 29, стр. 4, Москва, 119017 Россия

^eМосковский физико-технический институт,
Институтский пер., 9, Московская обл., г. Долгопрудный, 141701 Россия

*e-mail: tkachuzn@gmail.com

Поступила в редакцию 14.03.2023 г.

После доработки 04.04.2023 г.

Принята к публикации 26.04.2023 г.

Экспериментальные сезонные прогнозы модели климата INM-CM5 использовались как входные данные для температурно-временной фенологической модели пыления березы. В рамках совместной модели разработана тестовая технология сезонного прогноза сроков начала пыления березы на европейской территории России. Верификация данной технологии на сезонных ретроспективных прогнозах модели INM-CM5 (1991–2019) показала адекватное воспроизведение дат начала пыления березы, рассчитанных за аналогичный период по реанализу ERA5. Средние систематические ошибки составляют ± 2 дня, коэффициенты пространственной корреляции выше +0.84. Также оценены прогнозы даты начала пыления в 2022 году, рассчитанные по экспериментальным оперативным сезонным прогнозам модели INM-CM5 с месячной заблаговременностью и с нулевой заблаговременностью. Показано, что ошибки прогноза начала пыления составляют ± 5 –10 дней, причем у прогнозов с месячной заблаговременностью ошибки меньше. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что сезонный прогноз приземной температуры модели INM-CM5 можно использовать в качестве входной информации для температурно-временной фенологической модели для оперативного прогноза сроков начала пыления березы на европейской территории России.

Ключевые слова: сезонный прогноз, сроки пыления березы, фенологическая модель, пыльца березы, модель INM-CM5

DOI: 10.31857/S0002351523040053, **EDN:** YNCBRI

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в связи с бурным развитием вычислительных и информационных технологий совершенствование долгосрочных прогнозов, в том числе субсезонных и сезонных, переносятся в область гидродинамического моделирования [Вильфанд и др., 2019]. В Гидрометцентре России при составлении месячного и сезонного прогноза основных метеорологических полей в экспериментальном порядке успешно используется полулагранжева глобальная модель общей циркуляции атмосферы ПЛАВ [Толстых и др., 2015], а также проводятся экспериментальные совместные испытания технологии мультимодельного сезонного прогноза с моделями Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО) [Мирвис и др., 2008] и модели Института вычислительной

математики им. Г.И. Марчука INM-CM5 [Volodin E.M. et al., 2017]. Постепенное повышение успешности сезонных и субсезонных прогнозов позволяет использовать их для специализированного метеорологического обеспечения на масштабах времени от недель до месяцев в различных секторах экономики и социальной жизни, зависящих от погодно-климатических условий, и в частности, в задачах медицинского прогноза для людей с аллергическими заболеваниями.

Во всем мире наблюдается неуклонный рост различных форм аллергии и, в особенности, поллиноза — аллергической реакции на пыльцу растений [Klimek et al., 2019; Богова и др., 2008; Намазова-Баранова, 2011]. От 10 до 15% населения земного шара страдает поллинозом с ежегодным приростом числа заболевших на 3–4% [Вишнева и др., 2014;

Porteous et al., 2013]. В России поллинозом болеет до 30% взрослых и не менее 10% детей [Вишнева и др., 2014; Козулина и др., 2014; Хаитов и др., 2019]. В весенний период основной причиной поллиноза является пыльца березы.

Международный опыт свидетельствует об успешности введения профилактических мер для минимизации последствий от заболеваний, связанных с аллергическим ринитом и астмой. Так программа профилактики аллергических заболеваний и астмы с 2008 по 2018 гг. в Финляндии [Haahtela et al., 2021] помогла снизить с 2007 по 2017 гг. прямые расходы на здравоохранение и косвенные расходы в связи с потерей трудоспособности и производительности труда от 1.5 млрд до 1.8 млрд евро. Данный пример свидетельствует об особой актуальности разработки превентивных мер для смягчения последствий течения аллергенного сезона. Для краткосрочного прогноза распространения пыльцы в атмосферном воздухе используются совместные численные модели, объединяющие два блока: фенологический (созревание пыльцы) и транспортный (перенос пыльцы, влажное/сухое осаждение и т.д.) [Sofiev et al., 2015]. В настоящее время в Европе существует несколько подобных моделей [Kukkonen et al., 2012]. Модель COSMO-ART, адаптированная для прогноза переноса пыльцы березы в университете Карлсруэ [Helbig et al., 2004; Vogel et al., 2008] и в федеральной службе погоды и климата Швейцарии Meteoswiss [Pauling et al., 2012; Zink et al., 2013], используется для прогнозирования распространения пыльцы в центральной и юго-западной Европе. Прогноз переноса пыльцы березы для территории Северной Европы развивается в Дании на базе ENVIRO-HIRLAM [Mahura et al., 2009]. Еще один модуль разработан международным консорциумом в рамках проекта POLLEN [Siljamo et al., 2012; Sofiev et al., 2012a] на базе транспортной модели SILAM (System for Integrated modelling of Atmospheric composition, <http://silam.fmi.fi>). В [Sofiev et al., 2015] описаны еще 6 транспортных моделей, которые были использованы для ансамблевого прогноза переноса пыльцы березы для сезона 2013 года в рамках международной программы MACC: CHIMERE (<http://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/>), EMEP [Simpson et al., 2012], EURAD-IM (<http://www.eurad.uni-koeln.de>), LOTOS-EUROS (<http://www.lotos-euros.nl/>), MATCH (<http://www.smhi.se/en/research/researchdepartments/air-quality/match-transport-andchemistry-model-1.6831>), MOCAGE (http://www.cnrm-meteo.fr/gmgec-old/site_engl/mocage/mocage_en.html).

Сезонный прогноз пыления аллергенов развивается не так широко. В качестве характеристик, описывающих особенности всего пылевого сезона того или иного растительного аллергена, рассматривают сроки начала и конца пыления, максимальную концентрацию и суммарное количе-

ство пыльцы за весь сезон [Linkosalo et al., 2010; Myszkowska et al., 2011; Dorota, 2013]. В качестве характеристики сезона пыления в работах [D'Amato et al., 2007; Huynen et al., 2003; Sofiev et al., 2015; Bastl et al., 2016; Ritenberga et al., 2018] описан индекс SPI (seasonal pollen index), который представляет собой сумму суточных концентраций или сезонный интеграл концентраций пыльцы.

Большинство опубликованных работ представляют собой ретроспективные исследования, основанные на регрессионном анализе связей сезонных характеристик пыльцы и метеорологических параметров на конкретных станциях пыльцевого мониторинга. В работах [Laadi, 2001b; Latalowa et al., 2002] показано, что дата начала пыления является наименее изменчивым параметром (± 3 недели), тогда как конец пыления, максимальные концентрации и значение индекса SPI сильно варьируются год от года. В исследованиях [Linkosalo et al., 2010; Andersen, 1991; Fu et al., 2012; Norris-Hill, 1998; Rodriguez-Rajo et al., 2001] было показано, что температура воздуха до начала пыления березы является основным параметром, определяющим особенности наступающего сезона. Так для территории Финляндии выявлена зависимость даты начала пыления березы и злаковых трав от средней температуры апреля [Koi-vikko et al., 1986], для Англии [Newnham et al., 2013] от средней температуры марта. В масштабном исследовании [Emberlin et al., 2002] показана связь даты начала пыления со среднемесячной температурой воздуха с января текущего года. В работе [Dorota, 2013] методом множественной регрессии были оценены зависимости дат начала и конца пыления, дня максимальной концентрации, максимальной концентрации и индекса SPI от среднедекадных (10 дней) и среднемесячных значений метеорологических параметров: температуры воздуха, осадков, относительной влажности, облачности (в %) и продолжительности дня (количества часов от рассвета до заката за 20-летний период с 1991 по 2010 гг.). Показано, что регрессионные модели, учитывающие среднюю температуру воздуха в 51–60 дни года (от 1 января) и среднемесячную температуру воздуха в феврале и марте наиболее точно описывают дату начала пыления ($R^2 = 0.62$). В ряде исследований обсуждается связь особенностей пыления и метеорологических параметров в предыдущий сезон. В работе [Stach et al., 2008] делается вывод о значительной связи между интенсивностью сезона пыления березы и погодными условиями как в год до пыления, так и в рассматриваемый год.

Однако все статистические исследования по определению связи характеристик пыльцевого сезона и метеорологических условий имеют заметные ограничения по пространству и являются значимыми только для определенного географического региона, затрудняя тем самым использо-

вание данного подхода для больших территорий, как европейская часть России. Кроме того, в условиях современного изменения климата сокращается возможность использования подобного статистического подхода из-за доказанного смещения сроков начала пыления березы в разных областях Земного шара [Ziska et al., 2013].

В данной работе предложена технология сезонного прогноза начала пыления березы с применением фенологической модели прогноза развития пыления березы в весенний период с использованием прогностических полей модели INM-CM5 на сезон.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данные пыльцевого мониторинга

Наблюдения за концентрацией пыльцы в атмосферном воздухе осуществляются на станциях пыльцевого мониторинга. Всего в мире таких станций насчитывается более 600, на территории России в регулярном режиме работают несколько (в зависимости от года) станций, включая Московскую станцию аэропаллинологического мониторинга, расположенную на территории биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова [Носова и др., 2015]. В данном исследовании были использованы архивные ежедневные данные Московской станции в текстовом формате по концентрации пыльцы березы (количество ядер/м³) за 2001–2016 гг., которые ранее были представлены в открытом доступе на сайте www.allergology.ru, и данные за 2020–2021 были получены на сайте www.allergotop.ru.

Определение начала пыления березы по фенологическим моделям

В литературе обсуждается несколько подходов к определению даты начала пыления. При наличии длинного ряда наблюдений началом пыльцевого сезона считается день, в который накопленная концентрация пыльцы составляет от 1 [Emberlin et al., 2002; Sofiev et al., 2015] до 5% [Mullenders, 1974; Spieksma et al., 1995] от среднего суммарного годового количества пыльцы, регистрируемой на станции мониторинга. В работе [Ziska et al., 2019] в качестве даты начала предлагается считать четвертый последовательный день, когда в пыльцевой ловушке фиксируется пыльца. Однако, оба этих подхода могут быть применимы только для ретроспективных исследований и для ограниченной территории, на которой расположена станция мониторинга. Для оперативного прогноза целесообразно использовать фенологические модели.

Стадии развития растений в зависимости от изменений метеорологических параметров мож-

но описать фенологическими моделями [Емелина и др., 2019]. Основным фактором для созревания пыльцевых зерен аллергенов является температурный форсинг — период накопления тепла, необходимого для раскрытия почек. Процессы температурного форсинга математически описываются с помощью соответствующих функций и представляют собой суммированные по времени уровни форсинга, рассчитываемые разными способами в зависимости от среднесуточной температуры воздуха (формула 1):

$$S_f = \sum_{t_{1f}}^{t_{2f}} R_f, \quad (1)$$

где S_f — функция температурного форсинга; R_f — уровень форсинга; t_{1f} — начальная дата периода форсинга (накопления тепла); t_{2f} — конечная дата периода форсинга.

В зависимости от описания периодов температурного форсинга и охлаждения фенологические модели можно разделить на несколько групп: температурно-временная, последовательная, параллельная и переменная модель [Fu et al., 2012]. В исследованиях по определению даты начала пыления наиболее часто используется самая простая температурно-временная модель, она же применяется в численном краткосрочном прогнозе концентрации пыльцы с использованием транспортных моделей [Sofiev et al., 2015]. Температурно-временная модель или однофазная модель [Cannell et al., 1983; Linkosalo et al., 2010] не учитывает период охлаждения, а только период накопления тепла, который начинается от фиксированной даты. Уровень форсинга принимает нулевое значение при среднесуточной температуре ниже базовой (T_b) и равна разности между среднесуточной и базовой температурой, когда температура превышает базовую (формула 2). Когда функция форсинга достигает порогового значения, начинается выброс пыльцы. Для умеренных широт значение базовой температуры согласно [Cannell et al., 1983] составляет 5°C, по [Linkosalo et al., 2010] 3.5°C — этот порог используется в данной работе, а пороговое значение функции форсинга — 70°C, накопление стартует с 1 марта.

$$R_{f(t)} = \begin{cases} 0, & \text{если } T < T_b \\ T - T_b, & \text{если } T \geq T_b \end{cases}, \quad (2)$$

где R_f — уровень форсинга; T_b — базовая температура.

Модель INM-CM5

Для сезонного прогноза сроков начала пыления березы на европейской территории России с

Таблица 1. Статистические характеристики рядов фактических (по данным пыльцевого мониторинга) и расчетных (по реанализу ERA5) дат* начала пыления и их оценки. Москва (2000–2016, 2020–2021 гг.)

Характеристика	Мониторинг	ERA5
Среднее	114	112
Медиана	114	110
Минимум	100	101
Максимум	123	121
Стандартное отклонение	5.9	6.3
Коэффициент вариации	5.2	5.7
BIAS	—	–2
ABS	—	3

* Номер календарного дня года от 1 января, BIAS — средняя систематическая ошибка, ABS — абсолютная ошибка.

подходом применения фенологической модели были использованы экспериментальные прогнозы приземной температуры воздуха модели INM-CM5 на сезон. Основными блоками модели являются: блок динамики атмосферы, аэрозольный блок, блок динамики океана, дополненный блоком динамики и термодинамики морского льда. Разрешение в атмосферном блоке составляет $2^\circ \times 1.5^\circ$ по долготе и широте, 73 σ -уровня до высоты порядка 60 км, в океанском блоке $0.5^\circ \times 0.25^\circ$ по долготе и широте и 40 σ -уровней по вертикали. Более подробное описание модели INM-CM5 приведено в [Volodin E.M. et al., 2017]. Модель участвует в программе по сравнению климатических моделей CMIP6 [Eyring et al., 2016; Володин и др., 2017]. Для выбранной модели проведена верификация динамических процессов в стратосфере и тропосфере [Варгин и Володин, 2016; Варгин и др., 2018; Tarasevich and Volodin, 2021], воспроизведение моделью Эль-Ниньо и других наиболее важных погодно-климатических явлений [Volodin E.M. et al., 2017], а также экстремальных явлений [Tarasevich and Volodin, 2019]. Показано, что качество воспроизведения соответствует лучшим современным моделям [Kim et al., 2020; Volodin and Gritsun, 2018]. Для построения начальных состояний [Vorobyeva and Volodin, 2021a, b] на 22 января и февраля для хиндкастов (ретроспективных прогнозов) и 1 февраля и марта для оперативных прогнозов на 2022 г. используются ежедневные данные реанализа ERA5 [Hersbach et al., 2020] для атмосферы и деятельного слоя суши и анализа океана и морского льда SODA3.4.2 [Carton et al., 2018] для прогнозов до 2019 г./HEMO ГМЦ [Степанов и др., 2019] для прогнозов с 2021г. С подготовленных начальных данных выполнены серии прогнозов на весенние сезоны 1991–2019 гг. и 2022 г. с заблаговременностью 0 и 1 месяц. Продолжительность экспериментов составляет 6 месяцев. Размер ансамбля — 20 членов.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАТ НАЧАЛА ПЫЛЕНИЯ БЕРЕЗЫ ПО ДАННЫМ ПЫЛЬЦЕВОГО МОНИТОРИНГА И ПО РЕАНАЛИЗУ ERA5 В МОСКВЕ

По температурно-временной фенологической модели были рассчитаны даты начала пыления березы для имеющихся в наличии данных пыльцевого мониторинга по Москве (2001–2016, 2020–2021). В качестве данных температуры воздуха на 2 м были использованы архивы реанализа ERA5 [Hersbach H. et al., 2020] с пространственным разрешением $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ и временным разрешением 6 ч, которые были сформированы в среднесуточные архивы. Расчет производился для точки узла сетки, максимально приближенной к координатам г. Москва. В табл. 1 представлены статистические характеристики рассчитанных и фактических рядов за рассмотренный период. Систематическая ошибка за эти годы составляет –2 дня, абсолютная ошибка 3 дня, также близки и статистические характеристики. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что расчетные по фенологической модели даты начала пыления березы могут быть использованы в качестве фактических данных в дальнейшей оценке сезонных прогнозов даты начала пыления березы.

РАЙОНИРОВАНИЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Расчет даты начала пыления березы по сеточным данным было решено проводить не для конкретной точки, а для районов европейской территории. Поскольку основополагающим метеорологическим параметром, оказывающим влияние на начало пыления, является температура воздуха в марте, целесообразно районировать исследуемый регион именно по этой характеристике погодного режима. Анализировались ряды среднемесячной приземной температуры воздуха по реанализу ERA5 с 1979 по 2020 гг. Для того, чтобы провести районирование европейской территории к исходным полям температуры воздуха была применена процедура объективной типизации К-средних для поиска районов со схожими признаками изменчивости данного параметра во времени. Кластеризация методом К-средних — метод определения принадлежности элементов кластерам с помощью минимизации “расстояния” между элементами кластера и максимизации расстояния между кластерами [Хан, 2012]. Районирование европейской территории России по характеру межгодового хода приземной температуры воздуха в марте представлено на рис. 1. Каждому району на карте приписана своя цветовая градуировка. Таким образом, на европейской территории России можно выделить 3 условных района, которые должны отличаться между собой по дате наступления начала пыления, и в которых произрастает береза: услов-

Таблица 2. Статистические характеристики рядов расчетных дат начала пыления по реанализу ERA5 и по хинд-кастам модели INM-CM5 и их оценки по центральному району (1991–2020)

Характеристика	ERA5	INM-CM5	INM-CM5_корр
Среднее	113	127	113
Медиана	114	127	114
Минимум	101	122	108
Максимум	121	134	121
Стандартное отклонение	6.0	3.0	3.0
Коэффициент вариации	5.3	2.4	2.6
RMSE	1	1	1
BIAS		14	0
ABS		14	5

* Номер календарного дня года от 1 января, RMSE – среднеквадратическая ошибка, BIAS – средняя систематическая ошибка, ABS – абсолютная ошибка.

но северный (1), центральный (2) и южный (3). При этом станция аэропалинологического мониторинга в Москве принадлежит к району 2. Именно эти районы и будут рассмотрены далее при оценке качества прогноза начала пыления на европейской территории России.

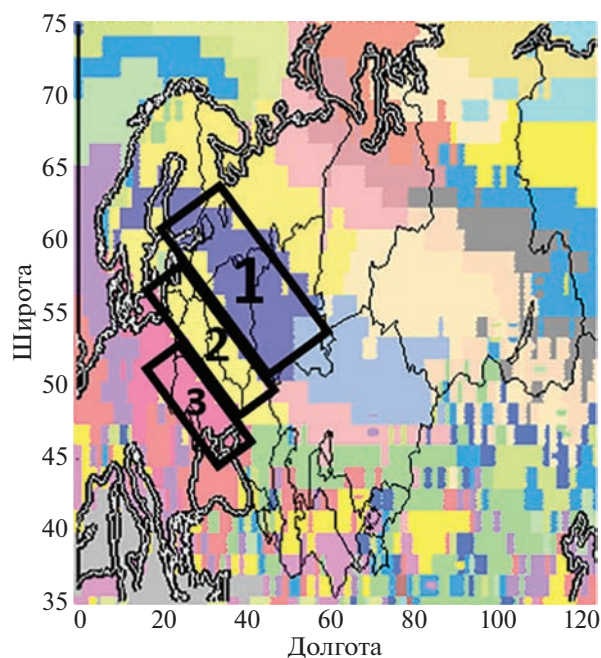
ПРОГНОЗ СРОКОВ НАЧАЛА ПЫЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ INM-CM5

На первом этапе были проанализированы статистические характеристики рядов дат начала пыления рассчитанных по данным ERA5 и по хиндкастам модели INM-CM5 за период 1991–2020 гг. Результаты для центрального района (рис. 1) представлены в табл. 2. Была выявлена систематическая ошибка модели INM-CM5 относительно данных реанализа в 13 дней. Для устранения данной ошибки была применена процедура коррекции на величину систематической ошибки. В результате систематическая ошибка была уменьшена до 1 дня, абсолютная ошибка после коррекции составила 5 дней. Далее все результаты приведены для скорректированных прогнозов.

Далее были оценены ошибки расчетных данных начала пыления березы на основе хиндкастов модели INM-CM5 в сравнении с расчетами по реанализу ERA5. Оценивались средние систематические ошибки и коэффициенты пространственной корреляции для выделенных выше районов: центрального (центр), северного (север) и южного (юг). Для повышения статистической значимости оценки проводились в режиме кроссвалидации (последовательным вычитанием 3 лет из 30-летнего периода). Результаты представлены в табл. 3. Средняя систематическая ошибка не превышает 1 день. Коэффициенты пространственной корреляции для всех трех районов выше 0.84.

Таблица 3. Средняя систематическая ошибка (*BIAS*), среднее квадратическое отклонение систематической ошибки и коэффициент пространственной корреляции (*R*) скорректированных прогнозов даты начала пыления березы, полученных в режиме кроссвалидации (1991–2020)

Ошибка	Север	Центр	Юг
<i>BIAS</i>	–0.2	–0.3	–0.2
<i>CKO(BIAS)</i>	0.8	0.9	2.0
<i>R</i>	0.84	0.97	0.91

**Рис. 1.** Районирование европейской территории России по характеру межгодовой изменчивости приземной температуры воздуха в марте: (1) северный, (2) центральный и (3) южный районы.

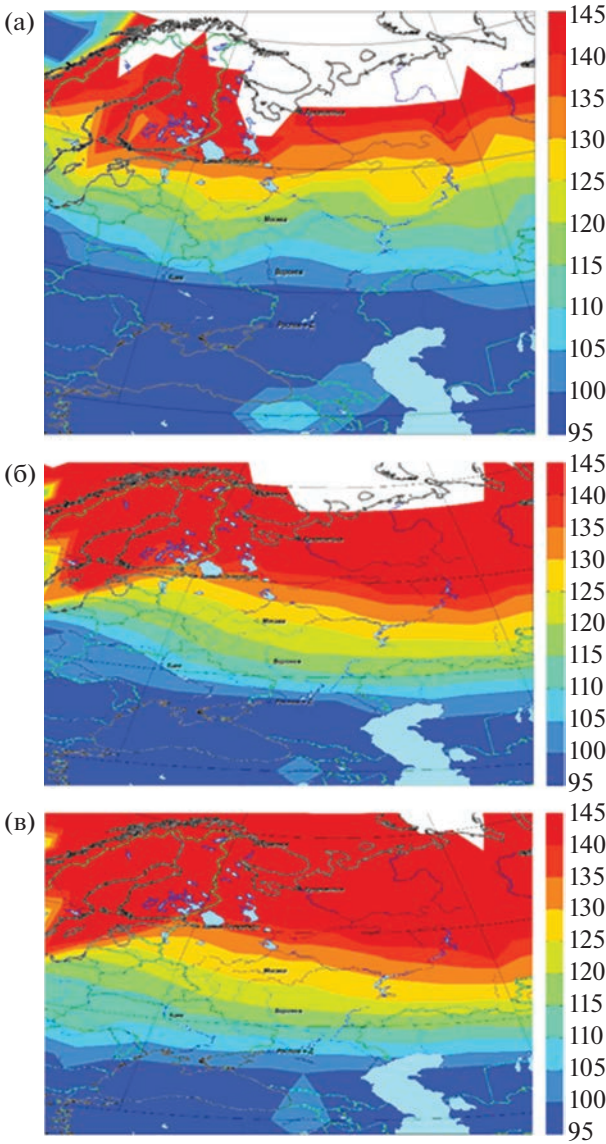


Рис. 2. Даты начала пыления березы (номер календарного дня года) на европейской территории России в 2022 году по расчетам (а) по данным ERA5; (б) по прогностическим данным INM-CM5 заблаговременностью 1 месяц, (в) по данным INM-CM5 нулевой заблаговременностью.

Таблица 4. Средняя систематическая ошибка (*BIAS*) и коэффициент пространственной корреляции (*R*) прогнозов даты начала пыления березы по экспериментальным оперативным прогнозам, модели INM-CM5

	Север		Центр		Юг	
	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>1</i>
<i>BIAS</i> (дни)	6	8	9	5	−10	−6
<i>R</i>	0.92	0.89	0.89	0.91	0.85	0.99

1 — прогноз заблаговременностью 1 месяц, *0* — прогноз с нулевой заблаговременностью.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОПЕРАТИВНЫЙ ПРОГНОЗ ДАТЫ НАЧАЛА ПЫЛЕНИЯ БЕРЕЗЫ В 2022 ГОДУ

На следующем этапе был рассчитана дата начала пыления на европейской территории России в 2022 году на основе экспериментальных оперативных сезонных прогнозов приземной температуры по модели INM-CM5 (20 членов ансамбля) с месячной заблаговременностью (от февраля) и с нулевой заблаговременностью (от марта). Пространственное распределение дат начала пыления березы по прогнозам разной заблаговременности и по реанализу ERA5 представлены на рис. 2. Видно, что на качественном уровне прогноз с месячной заблаговременностью в центре и на юге ЕТР визуально ближе к реанализу. Подтверждают это и оценки. В табл. 4 представлены систематическая ошибка прогноза и коэффициент пространственной корреляции.

В центральном и в южном районах систематическая ошибка ниже у прогнозов с месячной заблаговременностью (+5 и −6 дней), чем с нулевой заблаговременностью (+9 и −10 дней, соответственно), при этом в северном районе прогноз с нулевой заблаговременностью точнее на 2 дня (+6 и +8 дней). Коэффициенты пространственной корреляции во всех рассмотренных районах высокие (выше +0.85). При этом в центре и на севере сроки начала пыления, рассчитанные по данным оперативного прогноза и с нулевой, и с месячной заблаговременностью, наступают позже, чем по реанализу, а на юге — раньше.

Показанные результаты позволяют сделать вывод, что сезонный прогноз приземной температуры модели INM-CM5 можно использовать в качестве входной информации для температурно-временной фенологической модели для расчета сроков начала пыления на европейской территории России.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены предварительные результаты по созданию технологии сезонного прогноза начала пыления березы на европейской территории России, основанной на использовании фенологической модели и экспериментальных сезонных прогнозов модели INM-CM5. Для верификации данных моделирования даты начала пыления березы на европейской территории были рассчитаны по реанализу ERA5. Расчетные данные по дате начала пыления на основе хиндкастов модели INM-CM5 и реанализа ERA5 с 1991 по 2019 гг. были оценены в режиме кроссвалидации для нескольких районов европейской территории России. Оценки (средние систематические ошибки ±2 дня, коэффициенты пространственной корреляции выше +0.84) отражают высокое качество

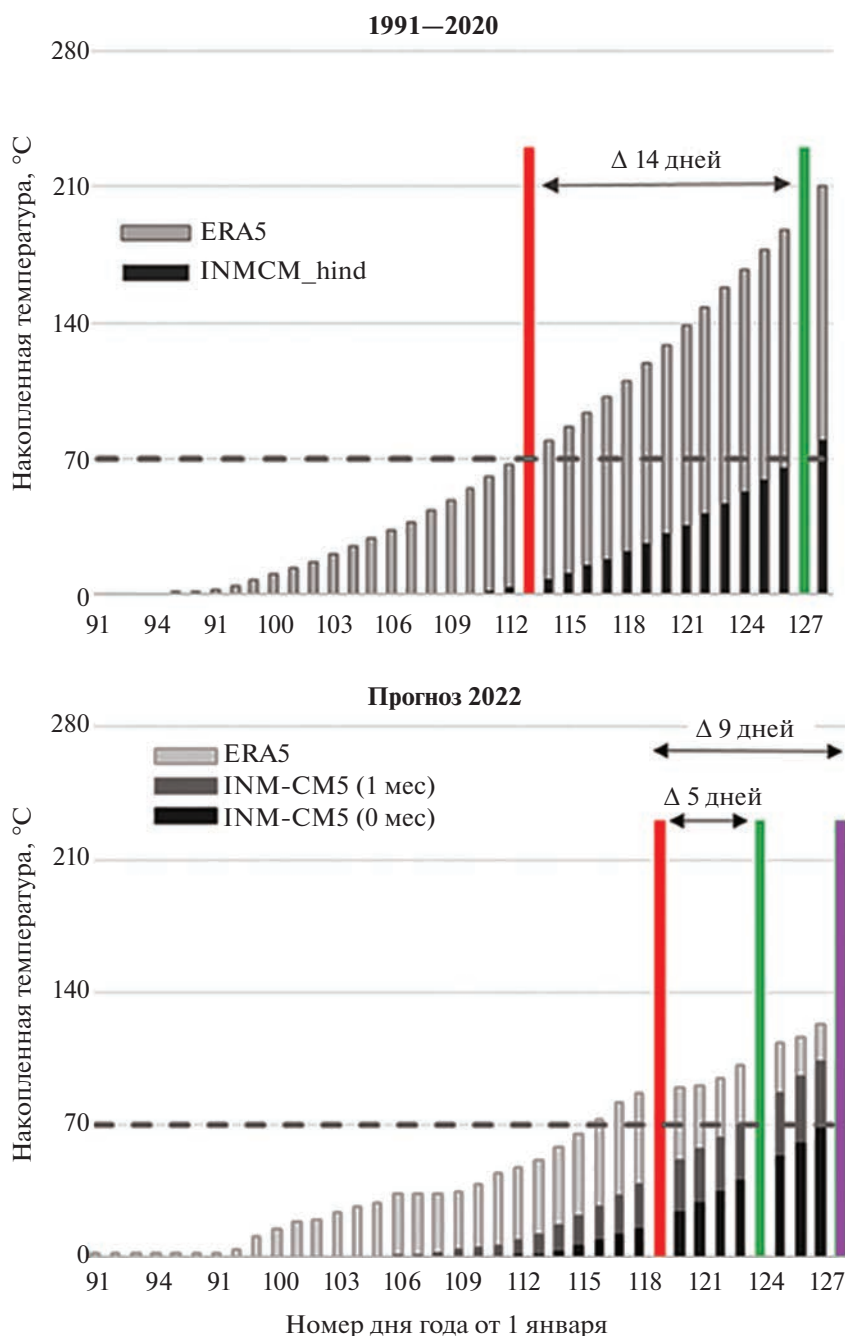


Рис. 3. Ход накопленной температуры в центральном районе: (а) по реанализу ERA5 и ретроспективным прогнозам INM-СМ5 1991–2020 гг., (б) по реанализу ERA5 и экспериментальным прогнозам INM-СМ5 с нулевой и месячной заблаговременностью. Серым пунктиром обозначен порог накопленной температуры для начала пыления (70°C). Красным выделена дата начала пыления березы (номер календарного дня года) по ERA5, фиолетовым – по INM-СМ5 месячной заблаговременностью, зеленым по INM-СМ5 с нулевой заблаговременностью.

воспроизведения даты начала пыления по ретроспективным прогнозам. Прогнозы начала пыления в 2022 году были рассчитаны на основе оперативных сезонных прогнозов по модели INM-СМ5 с месячной и с нулевой заблаговременностью. Прогностические даты начала пыления имеют высокую пространственную корреляцию с дата-

ми, рассчитанными по реанализу ERA5, во всех рассмотренных районах. При этом выявлено, что ошибки прогноза с месячной заблаговременностью в двух рассмотренных районах (в центральном и южном) ниже, чем у прогноза с нулевой заблаговременностью. По всей видимости, это связано с высокой зависимостью транспортно-

временной фенологической модели от качества прогноза приземной температуры в первые дни марта, когда у численной модели, стартующей также от 1 марта, еще происходит усвоение начальных условий (см. рис. 3). Для минимизации данных погрешностей и увеличения качества прогноза в оперативной практике планируется использовать сезонные прогнозы INM-CM5 со стартом расчета в середине февраля. Также следует отметить, что данный подход к оценке начала пылевого сезона с заблаговременностью 1–2 месяца применим только к оценке начала локального пыления березы. Поскольку пыльца березы может переноситься с воздушными потоками на расстояние до 1000 км [Sofiev et al., 2006], увеличение концентрации пылицы в атмосферном воздухе может происходить и до начала местного пыления. Однако прогноз заноса пылицы из соседних регионов возможен посредством использования транспортных моделей переноса, описанных во введении. Решение этой задачи планируется как продолжение данного исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 075-15-2021-577 с ИФА им. А.М. Обухова РАН) (разработка и оценка метода прогноза сроков пыления березы) и РНФ № 20-17-00190 (расчет ретроспективных и оперативных сезонных прогнозов с моделью INM-CM5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богова А.В., Ильина Н.И., Лусс Л.В. Тенденции в изучении эпидемиологии аллергических заболеваний в России за последние 10 лет // Российский аллергологический журн. 2008. № 6. С. 3–14.
- Варгин П.Н., Володин Е.М. Анализ воспроизведения динамических процессов в стратосфере климатической моделью ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 1. С. 3.
- Варгин П.Н., Кострыкин С.В., Володин Е.М. Анализ воспроизведения динамического взаимодействия тропосферы и стратосферы в расчетах климатической модели ИВМ РАН // Метеорология и гидрология. 2018. № 11. С. 34–39.
- Вильфанд Р.М., Заринов Р.Б., Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Крыжов В.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А., Толстых М.А., Хан В.М. Долгосрочные метеорологические прогнозы в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4(374). С. 12–36.
- Вишнева Е.А., Намазова-Баранова Л.С., Алексеева А.А. Современные принципы терапии аллергического ринита у детей // Педиатрическая фармакология. 2014. Т. 11. № 1. С. 6–14.
- Володин Е.М., Мортиков Е.В., Кострыкин С.В., Галин В.Я., Лысков В.Н., Гришун А.С., Дианский Н.А., Гусев А.В., Яковлев Н.Г. Воспроизведение современного климата в новой версии климатической модели ИВМ РАН // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. V. 53. № 2. Р. 164–178.
- Емелина С.В., Набокова Е.В., Рубинштейн К.Г. Сравнение фенологических моделей определения начала пыления березы для численного прогнозирования переноса аллергенов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 3(373). С. 151–160.
- Козулина И.Е., Курбачева О.М., Ильина Н.И. Аллергия сегодня. Анализ новых эпидемиологических данных // Российский аллергологический журн. 2014. № 3. С. 3–10.
- Мирвис В.М., Мелешко В.П. Современное состояние и перспективы развития метеорологических прогнозов на месяц и сезон // Труды ГГО. 2008. Вып. 558. С. 3–40.
- Намазова-Баранова Л.С. Аллергия у детей – от теории к практике. М.: Союз педиатров России, 2011. 668 с.
- Носова М.Б., Северова Е.Э., Волкова О.А. Многолетние исследования современных палинологических спектров в средней полосе европейской части России // Бюллетень московского общества испытателей природы. Отдел биологии. 2015. Т. 120. № 6. С. 42–50.
- Степанов В.Н., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Зеленко А.А. Крупномасштабная циркуляция океана и характеристики ледового покрова по данным численных экспериментов с использованием модели NEMO // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 50–66.
- Толстых М.А., Желен Ж.Ф., Володин Е.М., Богословский Н.Н., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Красюк Т.В., Кострыкин С.В., Мизяк В.Г., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Шляева А.В., Эзау И.Н., Юрова А.Ю. Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ. // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 25–35.
- Хаитов Р.М., Ильина Н.И. Аллергология и клиническая иммунология. Клинические рекомендации. М.: ГЭОТАР – Медиа, 2019. 352 с.
- Хан В.М. Усовершенствование долгосрочных метеорологических прогнозов на основе структурно-статистического подхода. Диссертация на соискание ученой степени д. г. н. Москва, 2012. 305 с.
- Andersen T.B. A model to predict the beginning of the pollen season // Grana. 1991. V. 30. P. 269–275.
- Bastl K., Kmenta M., Pessi A.M., Prank M., Saarto A., Sofiev M., Bergmann K.C., Buters J.T.M., Thibaudon M., Jäger S., Berger U. First comparison of symptom data with allergen content (Bet v 1 and Phl p 5 measurements) and pollen data from four European regions during 2009–2011 // Sci. Total Environ. 2016. V. 548–549. P. 229–235.
- Cannell M.G.R., Smith R.I. Thermal Time, Chill Days and Prediction of Budburst in Picea-Sitchensis // J. Applied Ecology. 1983. № 20. P. 951–963.
- Carton J.A., Chepurin G.A., Chen L. SODA3: A New Ocean Climate Reanalysis // J. Clim. 2018. V. 31. № 17. P. 6967–6983.
- D'Amato G., Cecchi L., Bonini S., Nunes C., Liccardi G., Popov T., Cauwenberge P. Van. Allergenic pollen and

- pollen allergy in Europe // *Allergy*. 2007. V. 9(62). P. 976–990.
- Dorota M. Prediction of the birch pollen season characteristics in Cracow, Poland using an 18-year data series // *Aerobiologia*. 2013. V. 29. P. 31–44.
- Eyring V., Bony S., Meehl G.A. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // *Geosci. Model Dev.* 2016. V. 9. № 5. P. 1937–1958.
- Haahntela T., Valovirta E., Saarinen K. et al. The Finnish Allergy Program 2008–2018: society-wide proactive program for change of management to mitigate allergy burden // *J. Allergy Clin Immunol.* 2021. V. 148. P. 319–326.
- Helbig N., Vogel B., Vogel H., Fiedler F. Numerical modeling of pollen dispersion on the regional scale // *Aerobiologia* (Bologna). 2004. V. 3. P. 3–19.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly J. Royal Meteorological Society*. 2020. V. 146. P. 1999–2049.
- Huynen M., Menne B., Behrendt H. et al. Phenology and Human Health: Allergic Disorders. 2003. World Health Organisation.
- Fu Y., Campioli M., Deckmyn G., Janssens I. The Impact of Winter and Spring Temperatures on Temperate Tree Budburst Dates: Results from an Experimental Climate Manipulation // *PLoS ONE*. 2012. V. 7(10). E. 47324.
- Kim Y.H., Min S.K., Zhang X. et al. Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices // *Weather and Climate Extremes*. 2020. V. 29. 100269
- Klimek L., Bachert C., Pfaar O. ARIA guideline 2019: treatment of allergic rhinitis in the German health system // *Allergo J. Int.* 2019. V. 28(7). P. 255–276.
- Koivikko A., Kupas R., Makinen Y., Pohjola A. Pollen seasons: forecasts of the most important allergenic plants in Finland // *Allergy*. 1986. V. 41(4). P. 233–242.
- Kukkonen J., Olsson T., Schultz D.M. et al. A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. P. 1–87.
- Laadi M. Regional variations in the pollen season of *Betula* in Burgundy: Two models for predicting the start of the pollination // *Aerobiologia*. 2001b. V. 17. P. 247–254.
- Latałowa M., Miętus M., Uruska A. Pollen seasonal variations in the atmospheric *Betula* pollen count in Gdańsk (southern Baltic coast) in relation to meteorological parameters // *Aerobiologia*. 2022. V. 18. P. 33–43.
- Linkosalo T., Ranta H., Oksanen A., Siljamo P., Luomajoki A., Kukkonen J. et al. A double-threshold temperature sum model for predicting the flowering duration and relative intensity of *Betula pendula* and *B. pubescens* // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2010. V. 150. P. 1579–1584.
- Mahura A., Baklanov A., Korsholm U. Parameterization of the birch pollen diurnal cycle // *Aerobiologia* (Bologna). 2009. V. 25. P. 203–208.
- Myszkowska D., Jenner B., Stepalska D., Czarnobilska E. The pollen dynamics and the relationship among some pollen season characteristics (start, end, annual total, pollen season phases) in Kraków, Poland, 1991–2008 // *Aerobiologia*. 2011. V. 27(3). P. 229–238.
- Newnham R., Sparks T., Skjøth C., Head K., Adams-Groom B., Smith M. Pollen season and climate: is the timing of birch pollen release in the UK approaching its limit? // *Int. J. Biometeorol.* 2013. V. 57. P. 391–400.
- Norris-Hill J. A method to forecast the start of the *Betula*, *Platanus* and *Quercus* pollen seasons in North London // *Aerobiologia*. 1998. V. 14. P. 165–170.
- Pauling A., Rotach M.W., Gehrig R., Clot B. A method to derive vegetation distribution maps for pollen dispersion models using birch as an example // *Int. J. Biometeorol.* 2012. V. 56. P. 949–958.
- Porteous T., Wyke S., Smith S., Bond C., Francis J., Lee A.J., Lowrie R., Scotland G., Sheikh A., Thomas M., Smith L. “Help for Hay fever”, a goal – focused intervention for people with intermittent allergic rhinitis, delivered in Scottish community pharmacies: study protocol a pilot cluster randomized controlled trial. // *Trials*. 2013. V. 15. № 14. P. 217.
- Ritenberga O., Sofiev M., Siljamo P., Saarto A., Dahl A., Ekeboom A., Sauliene I., Shalaboda V., Severova E., Hoebeke L., Ramfjord H. A statistical model for predicting the inter-annual variability of birch pollen abundance in Northern and North-Eastern Europe // *Science of the Total Environment*. 2018. V. 615. P. 228–239.
- Rodriguez-Rajo F.J., Frenguelli G., Jato M.V. Effect of air temperature on forecasting the start of the *Betula* pollen season at two contrasting sites in the south of Europe (1995–2001) // *International J. Biometeorology*. 2003. V. 47. P. 117–125.
- Siljamo P., Sofiev M., Filatova E., Grewling L., Jäger S., Khoreva E., Linkosalo T., Ortega Jimenez S., Ranta H., Rantio-Lehtimäki A., Svetlov A., Veriankaite L., Yakovleva E., Kukkonen J. A numerical model of birch pollen emission and dispersion in the atmosphere. Model evaluation and sensitivity analysis // *Int. J. Biometeorol.* 2012. V. 57. P. 125–136.
- Simpson D., Benedictow A., Berge H., Bergström R., Emberson L.D., Fagerli H., Flechard C.R., Hayman G.D., Gauss M., Jonson J.E., Jenkin M.E., Nyíri A., Richter C., Semeena V.S., Tsyro S., Tuovinen J.-P., Valdebenito Á., Wind P. The EMEP MSC-W chemical transport model – technical description // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. P. 7825–7865.
- Sofiev M., Siljamo P., Ranta H. Towards numerical forecasting of long-range air transport of birch pollen: theoretical considerations and a feasibility study // *Int. J. Biometeorol.* 2006. V. 50. P. 392.
- Sofiev M., Siljamo P., Ranta H., Linkosalo T. A numerical model of birch pollen emission and dispersion in the atmosphere, Description of the emission module // *Int. J. Biometeorol.* 2012(a). V. 57. P. 45–58.
- Stach A., Emberlin J., Adams-Groom B., Smith M., Myszkowska D. Factors that determine the severity of *Betula* spp. pollen seasons in Poland (Poznań and Cracow) and the United Kingdom (Worcester and London) // *International J. Biometeorology*. 2008. V. 52(4). P. 311–321.
- Tarasevich M.A., Volodin E.M. Influence of various parameters of INM RAS climate model on the results of ex-

- treme precipitation simulation // International Young Scientists School and Conference on Computational Information Technologies for Environmental Sciences, May 27–June 6, 2019. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. V. 386. P. 012012.
- Tarasevich M.A., Volodin E.M. The Influence of Autumn Eurasian Snow Cover on the Atmospheric Dynamics Anomalies during the Next Winter in INMCM5 Model Data // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2021. V. 8(4). P. 24–39.
- Vogel H., Pauling A., Vogel B. Numerical simulation of birch pollen dispersion with an operational weather forecast system // Int. J. Biometeorol. 2008. V. 52. P. 805–814.
- Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V. et al. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // Clim. Dyn. 2017. V. 49. P. 3715–3734.
- Volodin E.M., Gritsun A.S. Simulation of observed climate changes in 1850–2014 with climate model INM-CM5 // Earth System Dynamics. 2018. V. 9(4). P. 1235–1242.
- Vorobyeva V., Volodin E. Evaluation of the INM RAS climate model skill in climate indices and stratospheric anomalies on seasonal timescale // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2021. V. 73(1). P. 1–12. (a)
- Vorobyeva V.V., Volodin E.M. Experimental Studies of Seasonal Weather Predictability Based on the INM RAS Climate Model // Mathematical Models and Computer Simulations. 2021. V. 13(4). P. 571–578. (b)
- Zink K., Pauling A., Rotach M.W., Vogel H., Kaufmann P., Clot B. EMPOL 1.0: a new parameterization of pollen emission in numerical weather prediction models // Geosci. Model Dev. 2013. V. 6. P. 1961–1975.

Seasonal Hydrodynamic Forecasts of INM-CM5 Model for Estimation of the Start of the Birch Pollen Season

S. V. Emelina^{1, 2, 3, *}, V. M. Khan^{1, 2, 3}, V. A. Semenov^{3, 4}, V. V. Vorobyeva^{1, 2, 3},
M. A. Tarasevich^{1, 2, 5}, and E. M. Volodin^{1, 2, 3}

¹Hydrometeorological Center of Russia, Bolshoy Predtechensky per., 11–13, Moscow, 123242 Russia

²Institute of Numerical Mathematics RAS, Gubkina str., 8, Moscow, 119991 Russia

³Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky, 3, Moscow, 119017 Russia

⁴Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Staromonetnyi per., 29–4, Moscow, 119017 Russia

⁵Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per., 9, Moscow region, Dolgoprudny, 141701 Russia

*e-mail: tkachuzn@gmail.com

The experimental seasonal forecasts of the INM-CM5 climate model were used as input data for the temperature-time phenological model of birch dusting. Within the framework of the joint model, a test technology was developed for seasonal forecasting of the timing of the beginning of birch dusting in the European territory of Russia. Verification of this technology on seasonal retrospective forecasts of the INM-CM5 model (1991–2019) showed an adequate reproduction of the birch dusting start dates calculated for the same period according to the ERA5 reanalysis. The mean systematic errors are ± 2 days, and the spatial correlation coefficients are above +0.84. The forecasts of the date of dusting start in 2022, calculated from the experimental operational seasonal forecasts of the INM-CM5 model with a monthly lead-time and with a zero lead-time, are also evaluated. It is shown that the errors in forecasting the beginning of dusting are ± 5 –10 days, and the forecasts with a one-month lead-time have fewer errors. The obtained results allow us to conclude that the seasonal forecast of the surface temperature of the INM-CM5 model can be used as input information for the temperature-time phenological model for the operational forecast of the timing of the start of birch dusting in the European territory of Russia.

Keywords: seasonal forecast, start of the pollen season, phenological model, birch pollen, INM-CM5 model