

Учет влияния физико-географических условий на атмосферные процессы в районе прогнозирования

И.А. Яременко, И.А. Готюр, А.В. Костромитинов, Д.И. Казанцев

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, vka-onr@mil.ru

В статье предложена модель влияния физико-географических условий на атмосферные процессы в районе прогнозирования. Учет этих условий позволяет осуществлять подбор значимых для прогноза явлений в заданной местности метеорологических величин, что, в свою очередь, может обеспечить высокую оправдываемость разрабатываемых методов прогнозирования. Приведен анализ факторов, влияющих на формирование погодных условий в районе прогнозирования. Рассмотрен существующий подход к разработке физико-статистических методов прогнозирования, а также место влияния физико-географических условий на атмосферные процессы в этом подходе. Проведен анализ факторов, влияющих на формирование исследуемого явления. Предложена схема разработки методов прогнозирования на основе модели физико-географических условий конкретной местности.

Ключевые слова: физико-географические условия, опасные явления погоды, метеорологическая дальность видимости, физико-статистические методы прогнозирования, ковариационный анализ.

Accounting for influence of physical and geographical conditions on atmospheric processes in the forecasting area

I.A. Yaremenko, I.A. Gotur, A.V. Kostromitinov, D.I. Kazancev

Mozhaisky Military Space Academy, Saint-Petersburg, Russia, vka-onr@mil.ru

The article develops a model of influence of physical-geographical conditions on atmospheric processes in a forecast area. It considers the stages of development of physical and statistical methods of forecasting and substantiates the necessity of formalization of taking into account the influence of physical and geographical conditions when developing methods of forecasting hazardous weather phenomena. The analysis of factors influencing the formation of weather conditions in the forecast area is given. The article considers the existing approach to the development of physical and statistical methods of forecasting, as well as the place of the model of physical and geographical conditions in this approach. The analysis of factors influencing the formation of the phenomenon under study was carried out. The scheme of development of forecasting methods on the basis of the model of physical-geographical conditions of a particular area was proposed. As a result of modeling, the vector of predictors with smaller dimensionality and with values which make the greatest contribution to the formation of the phenomenon was obtained, which allows improving the quality of developing physical and statistical methods of forecasting by excluding the values that do not have a significant effect from the statistical analysis. By the example of modeling the influence of physical and geographical conditions on the formation of fog according to the data of three airports, the order of model application is given. Fog was selected as a phenomenon, with the factor of water bodies' presence in the forecast area selected as a factor of physical-geographical conditions. For this purpose, the terrain maps of the airports were analyzed and the azimuths of water body locations were calculated. The hypothesis about the impact of water bodies on the formation of fog was put forward. After analyzing the recurrence of wind directions in fog conditions and developing a criterion for accepting the hypothesis about the significance of the factor, a covariance analysis of the factors and meteorological values was performed in order to determine the most significant ones. After ranking the values by significance, the most influential ones were selected. The predictor vector composition obtained as a result of modeling can be

used as the input parameters for developing a forecasting method based on artificial neural networks. The application of the proposed model will make it possible to take into account the physical and geographical conditions at the stage of development of the forecasting method, without the need for further adaptation.

Keywords: physical-geographical conditions, weather hazards, meteorological visibility range, physical-statistical methods of forecasting, covariance analysis.

For citation: *I.A. Yaremenko, I.A. Gotur, A.V. Kostromitinov, D.I. Kazancev.* Accounting for influence of physical and geographical conditions on atmospheric processes in the forecasting area. *Gidrometeorologiya i Ekologiya. Journal of Hydrometeorology and Ecology.* 2021, 64: 544—557. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-544-557.

Введение

За последнее время наука заметно продвинулась в понимании физики мезомасштабных процессов [1—4]. Однако, несмотря на значительные успехи, достигнутые в области гидродинамического прогнозирования крупномасштабных гидрометеорологических полей, основным инструментом прогнозирования опасных явлений погоды (ОЯП) остаются методы, основанные на физико-статистических моделях, ввиду простоты расчетов и возможности адаптации этих методов к физико-географическим условиям (ФГУ) района прогнозирования [5—9]. Под физико-географическими условиями будем понимать обстановку в которой протекают атмосферные процессы, сформированную ландшафтом местности, наличием и взаимным расположением географических объектов.

Последовательность операций разработки физико-статистического метода прогнозирования ОЯП представлена на рис. 1.

Существующие физико-статистические методы прогнозирования метеорологических величин и явлений разрабатываются на основе базовой физической модели связи между предикторами и предиктантом [5].

На практике [10] апробация разработанного метода прогнозирования производится в пределах одной или смежных климатических зон, что создает предпосылки к необходимости адаптации метода для применения в физико-географических условиях, отличающихся от исходных. Возникает проблема прогнозирования ОЯП, возникающих под влиянием так называемых местных особенностей, или атмосферных процессов, протекающих под влиянием ФГУ района прогнозирования. Для более детального исследования этого вопроса с точки зрения оперативного прогнозирования ОЯП необходимо на основе базовой физической модели разработать модель влияния ФГУ на атмосферные процессы, которые участвуют в формировании явлений погоды.

В результате анализа работ в данной области [5—9, 11] можно сделать вывод о том, что на данный момент исследованы пути повышения оправданности прогнозов погоды путем пересчета коэффициентов регрессий для конкретного района и уточнения эмпирических коэффициентов для выбранного пункта прогнозирования. Недостатком таких подходов является то, что они не учитывают метеорологические величины, которые отсутствуют в базовых физических моделях явлений погоды. Одним из возможных направлений повышения качества разрабатываемых методов прогнозирования является поиск метеорологических

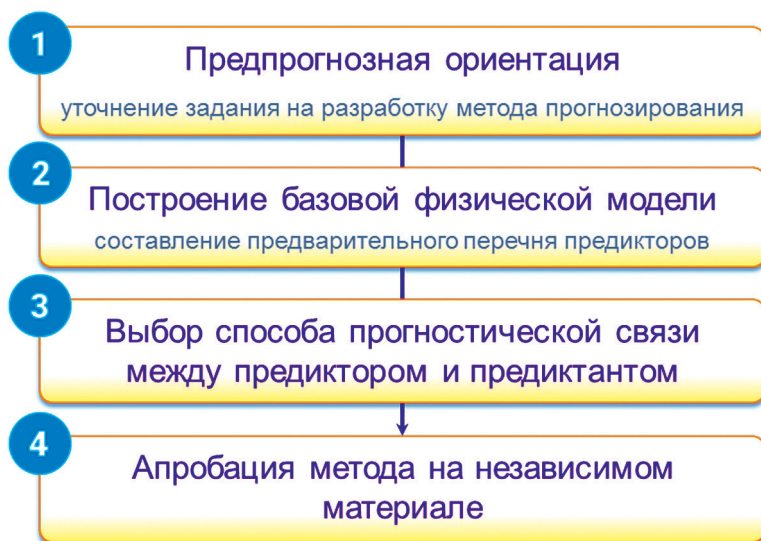


Рис. 1. Этапы разработки физико-статистических методов прогнозирования опасных явлений погоды.

Fig. 1. Stages of development of physical and statistical methods of forecasting hazardous weather phenomena.

характеристик, изменение которых объективно зависит от местных ФГУ, и их учет при разработке метода прогнозирования.

Также значимой является проблема излишней информативности вектора предикторов. Те величины, от которых искомая переменная объективно не зависит, снижают качество статистического анализа. Включение в анализ этих величин ухудшает свойства статистических процедур и, как следствие, ухудшается качество разрабатываемого метода прогнозирования. Для того, чтобы отобрать только значимые предикторы, необходимо провести анализ факторов ФГУ и связанных с ними изменений метеорологических величин, которые оказывают влияние на формирование условий ОЯП.

В рамках решения данной задачи предлагается при построении базовой физической модели связи между предикторами и предиктантом учитывать влияние конкретных ФГУ на формирование ОЯП, что в свою очередь позволит выявить значимые метеорологические величины, а также исключить из вектора предикторов наименее значимые.

Такой подход наиболее точно воспроизводит особенности климата данного региона, что имеет большое практическое значение, которое невозможно получить на основе общих моделей климата [12—14].

Целью статьи является разработка модели влияния ФГУ на атмосферные процессы для исследования их влияния на формирование ОЯП в конкретном регионе.

Модель влияния физико-географических условий на гидрометеорологические условия в районе прогнозирования

Для разработки метода прогнозирования необходимо знать состав зависимых метеорологических величин, который определяется для прогнозируемого района индивидуально. Проведем анализ факторов, оказывающих влияние на формирование погодных условий в районе прогнозирования [14]. Обозначим признак наличия исследуемого явления как w :

$$w = f_w(S_q, A_s, N_p), \quad (1)$$

где S_q — параметры, характеризующие распределение солнечной радиации; A_s — параметры, описывающие состояние атмосферы, а N_p — набор параметров, характеризующих состояние приземного слоя атмосферы.

Приток солнечной радиации имеет следующий состав параметров:

$$S_q = \langle \varphi, dt, dt_n \rangle, \quad (2)$$

где φ — широта местности; dt — дата (время года); dt_n — время суток. В свою очередь состояние атмосферы характеризуется метеорологическими величинами, измеряемыми в ходе проведения аэрологического зондирования атмосферы:

$$A_s = \langle T_l, Td_l, dd_l, ff_l \rangle, \quad (3)$$

где $l \in \{925, 850\}$; T_l — температура на уровне l ; Td_l — температура точки росы на уровне l ; dd_l и ff_l — направление и скорость ветра соответственно на уровне l .

Состояние приземного слоя атмосферы характеризуется вектором N_p :

$$N_p = \langle T, Td, dd, ff, V, W, N, H \rangle, \quad (4)$$

где T — температура воздуха на уровне 2 м; Td — температура точки росы; dd , ff — направление и скорость ветра соответственно; V — горизонтальная дальность видимости у земли; W — наблюдаемое явление погоды; N — количество баллов облачности нижнего яруса; H — высота нижней границы облачности.

Разработка методов прогнозирования в рамках физико-статистического подхода заключается в нахождении статистической зависимости между метеорологическими величинами (X) и прогнозируемым параметром (Y).

Схема прогнозирования гидрометеорологических характеристик [11] с использованием физико-статистических методов представлена на рис. 2.

В качестве вектора предикторов X используется следующий состав параметров:

$$X = \langle S_q, A_s, N_p \rangle. \quad (5)$$

Тогда $F(X)$ — функционал, устанавливающий связь между предиктором и предиктантом, а Y — результат прогнозирования явления w . Как видно из (5), состав X определяется на основе общих физических закономерностей и статистических

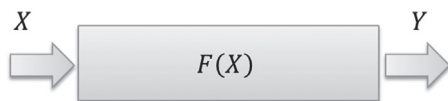


Рис. 2. Схема прогнозирования гидрометеорологических характеристик с использованием физико-статистического метода.

Fig. 2. Scheme of hydrometeorological characteristics prediction using the physical-statistical method.

связей, характерных для выбранных климатических зон, например для Европейской части территории России.

Проблема заключается в том, что рассчитанные коэффициенты регрессии, графики и номограммы дают удовлетворительное качество прогнозов только в той местности и в тех ФГУ, для которых они были разработаны. Для использования разработанного метода прогнозирования в ФГУ, отличных от исходных необходимо либо его адаптировать, что является трудоемким процессом, либо разрабатывать новый метод прогнозирования, что тоже является нетривиальной задачей.

Для решения задачи разработки метода прогнозирования, пригодного для применения в различных ФГУ, необходимо для каждого района прогнозирования определить состав вектора предикторов с учетом ФГУ этого района. Процесс определения этого состава сводится к нахождению такого $X_{\text{ФГУ}}^{\varphi}$, в составе которого будут метеорологические величины, определяемые факторами H^{φ} и оказывающие влияние на формирование явления w . На рис. 3 изображена предлагаемая схема прогнозирования с уточненным составом вектора предикторов, где ГМУ — это гидрометеорологические условия.

В данном подходе вектор предикторов может быть записан в виде:

$$X_{\text{ФГУ}}^{\varphi} = F_{\text{ФГУ}}(X, H^{\varphi}, w), \tag{6}$$

где H^{φ} — множество факторов, определяющих ФГУ для обозначенной территории φ . Состав множества H^{φ} характеризуется некоторыми особенностями, такими как рельеф местности, расположение гидрологических, промышленных и других объектов в районе прогнозирования и состоит из $H^{\varphi} = \{h_1^{\varphi}, \dots, h_k^{\varphi}\}$, где k — количество факторов.

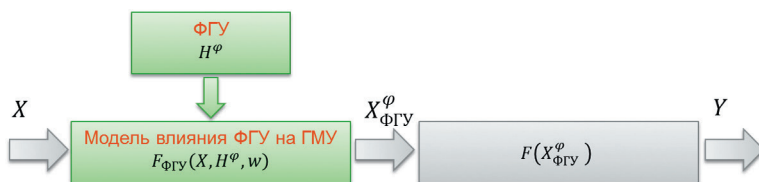


Рис. 3. Место модели влияния ФГУ на атмосферные процессы.

Fig. 3. The place of the model of influence of physiographic conditions on atmospheric processes.



Рис. 4. Существующая и предлагаемая схемы разработки методов прогнозирования гидрометеорологических характеристик.

Fig. 4. Existing and proposed schemes for the development of methods for predicting hydrometeorological characteristics.

Анализ факторов H^Φ и их влияния на условия формирования ОЯП позволяет выявить некоторые закономерности, отсутствующие в базовой физической модели. На рис. 4 представлена существующая схема разработки методов прогнозирования на основе базовой физической модели явления, где учет ФГУ осуществляется косвенным образом за счет применения методов адаптации и нахождения недостающих стохастических связей. Предлагается такая схема разработки методов прогнозирования, в которой влияние ФГУ на образование явления будет учитываться при разработке метода.

Для примера выполним анализ факторов H^Φ и их влияния на формирование тумана. В базовой физической модели тумана в качестве предикторов выступают температура и влажность воздуха. Условиями образования тумана является либо понижение температуры, либо повышение относительной влажности воздуха. Так, на повышение влажности воздуха над определенной территорией значительное влияние оказывает перенос более влажного воздуха с поверхности водоемов. Например, сочетание таких факторов, как наличие водоема (h_1^Φ) и определенные значения скорости и направления ветра ($dd \in [dd_{h_1^\Phi}^1; dd_{h_1^\Phi}^2]; ff \in [ff_{h_1^\Phi}^1; ff_{h_1^\Phi}^2]$), может оказать решающее воздействие на образование тумана. Следует отметить, что набор признаков, а также состав величин и диапазон значений определяется для каждого района индивидуально.

Исходя из вышесказанного для составления метода прогнозирования, применимого в конкретных ФГУ, необходимо решить несколько задач, представленных на рис. 5.

В рамках данной статьи рассмотрим первые 3 задачи.

Для прогнозирования условий формирования тумана необходимо знать возможные причины увеличения относительной влажности воздуха или понижения

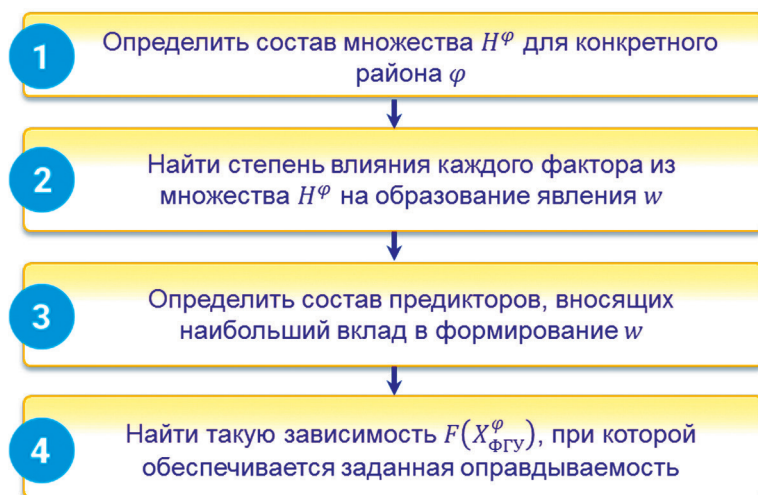


Рис. 5. Перечень задач, решаемых в ходе разработки метода прогнозирования опасных явлений погоды с учетом физико-географических условий района прогнозирования.

Fig. 5. List of tasks to be solved during the development of the method of forecasting hazardous weather phenomena, taking into account the physical and geographical conditions of the forecasting area.

температуры в районе прогнозирования. Источником дополнительной влаги в атмосфере могут быть: водные объекты поблизости, наличие значительного лесного массива, болотистой местности.

На изменение температуры воздуха наибольшее влияние оказывают: прохождение атмосферных фронтов, бризы, фены, бора, муссоны, наличие горных массивов и их характеристики (протяженность, высота, меридиональная или широтная направленность, высота места, крутизна и экспозиция склонов). На образование тумана могут оказывать влияние различные антропогенные факторы, например, промышленные объекты, выбросы от которых могут стать ядрами конденсации тумана. К основным факторам ФГУ, влияющим на образование тумана, относятся: h_1^φ – наличие водных объектов; h_2^φ — наличие стоковых ветров; h_3^φ — время суток; h_4^φ — наличие параллельных возвышенностей, ось которых направлена через станцию φ ; h_5^φ – бризы. На рис. 6 представлена общая схема влияния указанных факторов на образование тумана.

Анализ данных метеорологических наблюдений в различных ФГУ позволит выявить значимость влияния каждого фактора на формирование тумана. Для этого была сформирована выборка по данным метеорологических наблюдений и аэрологических измерений нескольких аэропортов. Для каждого аэропорта была рассчитана повторяемость наблюдаемого явления, а также условия, в которых оно наблюдалось. На основе анализа фактора ФГУ h_k^φ делается предположение о связи между фактором h_k^φ и вектором величин X_k^φ .



Рис. 6. Схема влияния факторов физико-географических условий на образование тумана.
 Fig. 6. Scheme of the influence of factors of physical and geographical conditions on the formation of fog.

Для определения степени влияния фактора ФГУ h_k^ϕ и элементов вектора X_k^ϕ на образование явления w рассчитывается повторяемость явления $Pw_{\langle Z \rangle}$:

$$Pw_{\langle Z \rangle} = \{p_{w_i}\}, i = 1(1)Z, \quad (7)$$

где Z — количество градаций величины из состава X_k^ϕ . На основе вектора $Pw_{\langle Z \rangle}$ вычисляется вектор повторяемости явления, превышающей ϵ_h :

$$P_{\langle J \rangle}^{\epsilon_h} = \{p_{i,j}^{\epsilon_h} \in Pw : p_{i,j} > \epsilon_h\}, j = 1(1)J, \quad (8)$$

тогда:

$$I_{\langle J \rangle} = \{i_j\}, j = 1(1)J. \quad (9)$$

На основе анализа вектора составляется предполагаемое множество значимых градаций:

$$M_{\langle Z \rangle} = \{m_i\}, i = 1(1)Z, \quad (10)$$

где $M_{\langle Z \rangle}$ — множество признаков наличия / отсутствия влияющих ФГУ в соответствии с $Pw_{\langle Z \rangle}$. Множество предполагаемых значимых градаций имеет вид:

$$M_{\langle O \rangle}^1 = \{m_{i,o}^1 \in M_{\langle Z \rangle} : m_{i,o}^1 = m_i = 1\}, o = 1(1)O, \quad (11)$$

где O — количество значимых предполагаемых градаций. Тогда пересечение значимых градаций вектора предполагаемых градаций и градаций вектора повторяемости явления будет иметь вид:

$$PM_{\langle R \rangle} = \{pm_{i,j} \in M_{\langle Z \rangle} : i \in I_{\langle J \rangle}\}, r = 1(1)R, \quad (12)$$

где R — количество совпавших предполагаемых значимых градаций и градаций с повторяемостью, превышающей ϵ_h .

Далее рассматривается вопрос о том, влияет ли фактор h_k^{ϕ} на формирование явления w . С этой целью вводится показатель θ , по значению которого принимается решение о влиянии или отсутствии влияния фактора h_k^{ϕ} на формирование явления:

$$\theta = \frac{J - R}{O}, \quad (13)$$

где J — множество градаций, повторяемость наблюдения явления в которой превышает заданный эмпирический порог ε_n ; O — предполагаемые градации величины, имеющие наибольший вклад в формирование явления; R — количество совпавших предполагаемых значимых градаций и градаций с повторяемостью, превышающей ε_n . Порог значений принятия решения ε_{θ} определяется путем экспертных оценок. Так, при $\varepsilon_{\theta} = 0,5$ и $\theta \geq \varepsilon_{\theta}$ полагается, что фактор h_k^{ϕ} влияет на формирование явления w , в противном случае, когда $\theta < \varepsilon_{\theta}$, полагается, что влияние фактора либо незначительное, либо отсутствует.

Если $\theta \geq \varepsilon_{\theta}$, то справедливым становится утверждение:

$$X_k^{\phi} \in X_{\text{ФГУ}}^{\phi}. \quad (14)$$

После этого определяется вклад каждого предиктора в образование тумана. Так как в качестве предикторов выступают и количественные, измеренные величины и качественные факторы, а в качестве предиктанта качественный показатель наличия тумана, то для определения вклада каждого предиктора необходимо провести ковариационный анализ (15):

$$Y_{bc}^w = \mu_b + \beta \left(X_{bc}^{\text{ФГУ}} - \overline{X^{\text{ФГУ}}} \right) + e_{bc}, \quad (15)$$

где Y_{bc}^w — это c -ое наблюдение b -ой группы (наличие или отсутствие тумана); μ_b — среднее значение b -ой группы; e_{bc} — ошибка; β — неизвестный коэффициент, вычисляемый в процессе обучения на тестовой выборке.

Далее производится ранжирование полученного вектора предикторов по их вкладу в формирование явления и отбираются метеорологические величины, значение коэффициента β которых превышает заданный эмпирический порог ε_{β} .

Общий вид модели представлен на рис. 7.

По результатам анализа получаем ранжированные величины с вычисленным уровнем их вклада в формирование явления w . Далее производится отбор величин $X_{\text{ФГУ}}^{\phi}$, наиболее значимых для заданных ФГУ, что является итогом работы предложенной модели. Так как $X_{\text{ФГУ}}^{\phi} \in X \wedge X_{\text{ФГУ}}^{\phi} \neq X$, вектор $X_{\text{ФГУ}}^{\phi}$ обладает меньшим количеством параметров, чем полный вектор X .

Таким образом, решена задача снижения размерности вектора предикторов за счет учета влияющих факторов. Выполним проверку предложенной модели на примере трех аэропортов: Туссе-ле-Наболь (Франция), Рузине (Чехия), Татры (Словакия).

Выдвинем гипотезу, что для района прогнозирования ϕ и фактора ФГУ h_1^{ϕ} (наличия водоема в районе прогнозирования) значимой величиной будет

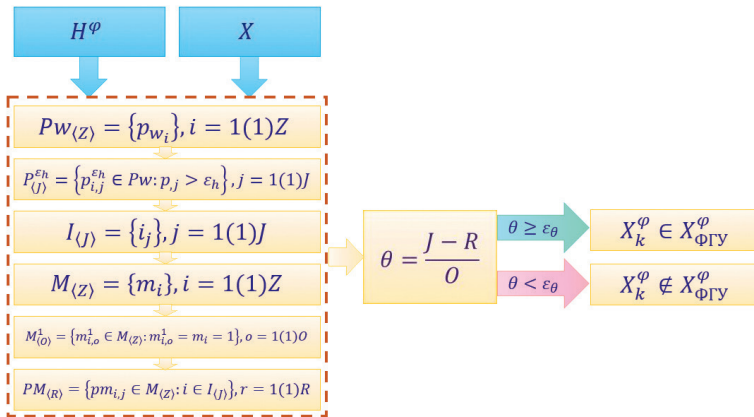


Рис. 7. Модель влияния физико-географических условий на атмосферные процессы в районе прогнозирования.

Fig. 7. Model of influence of physical and geographical conditions on atmospheric processes in the forecasting area.

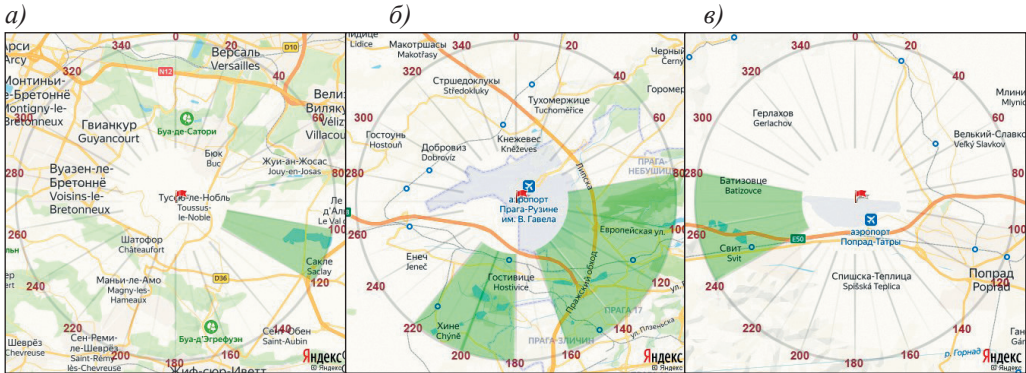


Рис. 8. Карты местности аэропортов:

а) Туссе-ле-Наболь; б) Рузине; в) Татры.

Fig. 8. Airport location maps:

а) Toussus le Noble; б) Ruzyně; в) Tatry.

направление ветра dd_{φ}^1 . На основе анализа карт районов прогнозирования, представленных на рис. 8, составим табл. 1 с азимутами расположения водоемов в градациях величины dd_{φ}^1 .

Результаты расчетов повторяемости направлений ветра в условиях наблюдения тумана у поверхности земли для величин X_k^φ , где $X_k^\varphi = \left\{ dd_{h_1}^\varphi \right\}$ приведены в табл. 2 и на рис. 9.

Таблица 1

Значение фактора ФГУ h_1° (наличия водоема в районе прогнозирования) для аэропортов

The importance of the factor of physical and geographical conditions (the presence of a water source in the forecast area) for airports

Название	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340
Туссе-ле-Наболь	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Рузине	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Татры	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0

Таблица 2

Повторяемость направлений ветра в условиях наблюдения тумана у поверхности земли

Repeatability of wind under surface fog conditions

Название	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340
Туссе-ле-Наболь	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05	0,13	0,13	0,06	0,07	0,08	0,07	0,05	0,05	0,04	0,02	0,05	0,08	0,05
Рузине	0,04	0,07	0,05	0,07	0,1	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,07	0,05	0,05	0,03	0,03	0,07	0,11
Татры	0,02	0,05	0,08	0,08	0,04	0,03	0,03	0,05	0,04	0,02	0,02	0,03	0,1	0,17	0,09	0,06	0,04	0,03

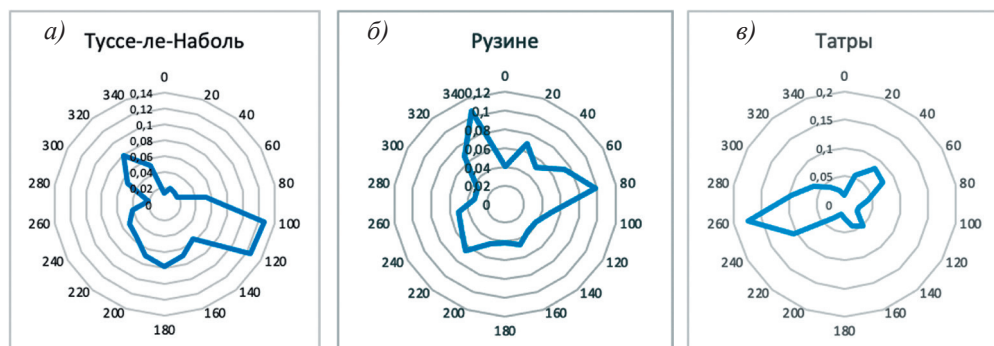


Рис. 9. Повторяемость направлений ветра в условиях наблюдения тумана у поверхности земли:

а) Туссе-ле-Наболь; б) Рузине; в) Татры.

Fig. 9. Repeatability of wind directions under surface fog conditions.

a) Toussus le Noble; б) Ruzyne; в) Taty.

Анализ рисунков 8 и 9, а также таблиц 1 и 2 позволяет сделать вывод о том, что для аэропорта Туссе-ле-Наболь гипотеза о значимости величины $dd_{h_1^{\circ}}$ является верной вследствие значительного преобладания повторяемости направлений ветра в градации 100–120° в условиях наблюдения тумана у поверхности земли. Данная градация совпадает с азимутом водоема. Для аэропорта Рузине сложно выделить приоритетное направление, поэтому гипотеза отвергается. Гипотеза

о том, что для аэропорта Татры дополнительным источником влаги для создания благоприятных условий формирования тумана является группа водоемов с азимутом 240—280° подтверждается, что совпадает с наибольшей повторяемостью направления ветра в тумане для данного района. Таким образом получаем:

$$\begin{aligned} X_1^{\varphi_1} &= \left\{ dd_{h_1^{\varphi_1}} \right\} \in X_{\text{ФГУ}}^{\varphi}, \\ X_1^{\varphi_2} &= \emptyset \notin X_{\text{ФГУ}}^{\varphi}, \\ X_1^{\varphi_3} &= \left\{ dd_{h_1^{\varphi_3}} \right\} \in X_{\text{ФГУ}}^{\varphi}, \end{aligned} \quad (16)$$

где φ_1 — аэропорт Туссе-ле-Наболь; φ_2 — аэропорт Рузине; φ_3 — Татры.

В результате выполненного исследования получены оценки о влиянии ФГУ на атмосферные процессы, протекающие в районе прогнозирования и их влияние на формирование ОЯП на примере наличия тумана в районе аэропортов Туссе-ле-Наболь, Рузине, Татры.

Заключение

В статье описана модель влияния физико-географических условий на атмосферные процессы в районе прогнозирования, которая может быть использована не только для разработки методов прогнозирования ОЯП. На сегодняшний день большое развитие получили так называемые методы машинного обучения, в том числе искусственные нейронные сети, которые позволяют в значительной степени автоматизировать поиск функционала отражения вектора предикторов на вектор предиктантов. В то же время перед исследователем остро стоит проблема отбора значимых величин и снижения размерности вектора предикторов. Полученный в результате моделирования состав вектора предикторов может использоваться в качестве входных параметров для разработки метода прогнозирования на основе искусственных нейронных сетей. Применение предложенной модели, на наш взгляд, позволит учитывать ФГУ на этапе разработки метода прогнозирования без необходимости дальнейшей адаптации.

Авторы выражают глубокую признательность главному редактору В.Н. Малинину за внимательное отношение к рукописи статьи.

Список литературы

1. Фокина К.В., Булгаков К.Ю., Восканян К.Л. Численное моделирование бризовой циркуляции // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2019. № 56. С. 50—60.
2. Johnson R., Mapes B. Mesoscale Processes and Severe Convective Weather // Severe Convective Storms. 2001. P. 71—122. doi: 10.1007/978-1-935704-06-5_3.
3. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M., Alferov D.Yu., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kazakova E.V., Kirsanov A.A., Nikitin M.A., Perov V.L., Surkova G.V., Revokatova A.P., Shatunova M.V., Chumakov M.M. The COSMO-Ru system of nonhydrostatic mesoscale short-range weather forecasting of the Hydrometcenter of Russia: The second stage of implementation and development // Russ. Meteorol. Hydrol. 2015. V. 40. P. 400—410. doi: 10.3103/S1068373915060060.

4. Akihida, S., Kazuo, K., Hajime, N., Mitsuru, U., Isao, T., Yasuo, T. Operational MesoScale Weather Prediction with Japan Spectral Model // Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II. 1989. V. 67. 5. P. 907—924. doi: 10.2151/jmsj1965.67.5_907.
5. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Физико-статистический метод прогноза океанологических характеристик (на примере Северо-Европейского бассейна). Мурманск: Изд. ПИИРО, 2003. 164 с.
6. Борисов А.А., Маков А.Б. Технология адаптации физико-статистических методов прогнозирования к физико-географическим условиям арктических районов Российской Федерации // Навигация и гидрография. 2016. № 44. С. 71—78.
7. Sillmann J., Thorarinsdottir T., Keenlyside N., Schaller N., Alexander L.V., Hegerl G., Seneviratne S.I., Vautard R., Zhang X., Zwiers F.W. Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities // Weather and Climate Extremes. 2017. V. 18. P. 65—74. doi: 10.1016/j.wace.2017.10.003.
8. Karstens C.D., Stumpf G., Ling C., Hua L., Kingfield D., Smith T.M., Correia J. Jr., Calhoun K., Ortega, K., Melick C., Rothfus L.P. Evaluation of a Probabilistic Forecasting Methodology for Severe Convective Weather in the 2014 Hazardous Weather Testbed // Weather and Forecasting. 2015. V. 30. P. 1551—1570. doi: 10.1175/WAF-D-14-00163.1.
9. Morss R.E., Demuth J.L., Lazrus H., Palen L., Barton C.M., Davis C.A., Snyder C., Wilhelmi O.V., Anderson K.M., Ahijevych D.A., Anderson J., Bica M., Fossell K.R., Henderson J., Kogan M., Stowe K., Watts J. Hazardous Weather Prediction and Communication in the Modern Information Environment // Bulletin of the American Meteorological Society 98. 2017. V. 12. P. 2653—2674. doi: 10.1175/BAMS-D-16-0058.1.
10. Руководство по практическим работам метеорологических подразделений авиации Вооруженных Сил. М.: Воениздат, 1992. 486 с.
11. Суворов С.С., Девяткин А.М., Кулешов Ю.В., Маков А.Б. Динамико-стохастический подход в задачах адаптации методов прогнозирования опасных явлений // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2008. № 4. С. 107—110.
12. Scher S., Messori G. How global warming changes the difficulty of synoptic weather forecasting // Geophysical Research Letters. 2019. V. 46. P. 2931—2939. doi: 10.1029/2018GL081856.
13. Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В., Раевский А.Н., Смекалова Л.К., Школьный Е.П. Климатология. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 568 с.
14. Федоров В.М. Корреляционный анализ инсоляции земли и аномалии приповерхностной температуры // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2016. № 45. С. 151—168.

References

1. Fokina, K.V., Bulgakov, K.Yu., Voskanyan, K.L. Numerical simulation of breeze circulation. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2019, 56: 50—60. [In Russian].
2. Johnson R., Mapes B. Mesoscale Processes and Severe Convective Weather. Severe Convective Storms. 2001: 71—122. doi: 10.1007/978-1-935704-06-5_3.
3. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M., Alferov D.Yu., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kazakova E.V., Kirsanov A.A., Nikitin M.A., Perov V.L., Surkova G.V., Revokatova A.P., Shatunova M.V., Chumakov M.M. The COSMO-Ru system of nonhydrostatic mesoscale short-range weather forecasting of the Hydrometcenter of Russia: The second stage of implementation and development. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2015, 40: 400—410. doi: 10.3103/S1068373915060060.
4. Akihida S., Kazuo K., Hajime N., Mitsuru U., Isao T., Yasuo T. Operational MesoScale Weather Prediction with Japan Spectral Model. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II.* 1989, 67, 5: 907—924. doi: 10.2151/jmsj1965.67.5_907.
5. Malinin V.N., Gordeeva S.M. *Fiziko-statisticheskij metod prognoza okeanologicheskix xarakteristik (na primere Severo-Evropejskogo bassejna)*. Physical and statistical method for predicting oceanological characteristics (on the example of the North European basin). *Murmansk: Iss. PINRO*, 2003: 164 p. [In Russian].

6. Borisov A.A., Makov A.B. Technology for adapting physical and statistical methods of forecasting to the physical and geographical conditions of the Arctic regions of the Russian Federation. *Navigaciya i gidrografiya*. Navigation and hydrography. 2016, 44: 71—78. [In Russian].
7. Sillmann J., Thorarindottir T., Keenlyside N., Schaller N., Alexander L.V., Hegerl G., Seneviratne S.I., Vautard R., Zhang X., Zwiers F.W. Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities. *Weather and Climate Extremes*. 2017, 18: 65—74. doi: 10.1016/j.wace.2017.10.003.
8. Karstens C.D., Stumpf G., Ling C., Hua L., Kingfield D., Smith T.M., Correia J. Jr., Calhoun K., Ortega K., Melick C., Rothfus L.P. Evaluation of a Probabilistic Forecasting Methodology for Severe Convective Weather in the 2014 Hazardous Weather Testbed. *Weather and Forecasting*. 2015, 30: 1551—1570. doi: 10.1175/WAF-D-14-00163.1.
9. Morss R.E., Demuth J.L., Lazrus H., Palen L., Barton C.M., Davis C.A., Snyder C., Wilhelmi O.V., Anderson K.M., Ahijevych D.A., Anderson J., Bica M., Fossell K.R., Henderson J., Kogan M., Stowe K., Watts J. Hazardous Weather Prediction and Communication in the Modern Information Environment. *Bulletin of the American Meteorological Society* 98. 2017, 12: 2653—2674. doi: 10.1175/BAMS-D-16-0058.1.
10. *Rukovodstvo po prakticheskim rabotam meteorologicheskikh podrazdelenii aviacii Vooruzhennuh Sil*. Manual for practical work of meteorological units of aviation of the Armed Forces. Moscow: Voenizdat, 1992: 486 p. [In Russian].
11. Suvorov S.S., Devyatkin A.M., Kuleshov Y.V., Makov A.B. Dynamical-stochastic approach in the tasks of adaptation of methods of forecasting hazardous phenomena. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*. Herald of St. Petersburg University. Earth Sciences. 2008: 107—110. [In Russian].
12. Scher, S., Messori, G. How global warming changes the difficulty of synoptic weather forecasting. *Geophysical Research Letters*. 2019, 46: 2931—2939. doi: 10.1029/2018GL081856.
13. Drozdov O.A., Vasiliev V.A., Kobysheva N.V., Raevsky A.N., Smekalova L.K., Shkolny E.P. *Klimatologiya*. Climatology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989: 568 p. [In Russian].
14. Fedorov V.M. Correlation analysis of ground insolation and surface temperature anomaly. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2016, 45: 151—168. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 11.06.2021

Принята к публикации после доработки 25.08.2021

Сведения об авторах

Готюр Иван Алексеевич, д-р техн. наук, доцент, начальник 52 кафедры Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, vka-onr@mil.ru.

Костромитинов Алексей Валерьевич, канд. техн. наук, преподаватель 52 кафедры Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, vka-onr@mil.ru.

Казанцев Денис Иванович, начальник отдела информационных технологий Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, vka-onr@mil.ru.

Яременко Иван Андреевич, адъюнкт 52 кафедры Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, vka-onr@mil.ru.

Information about authors

Gotur Ivan Alexeevich, Grand PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, head of the Department, Mozhaisky Military Space Academy.

Kostromitinov Alexey Valeryevich, PhD (Tech. Sci.), Educator, Mozhaisky Military Space Academy.

Kazantsev Denis Ivanovich, Head of IT, Mozhaisky Military Space Academy.

Yaremenko Ivan Andreevich, graduate student, Mozhaisky Military Space Academy.