

# НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ АНТРОПОГЕННОГО ИСТОЧНИКА ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

М. О. Гедзенко, Е. Г. Доронина, А. В. Самсонов

*Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина (г. Воронеж)*

Поступила в редакцию 08.11.2014 г.

**Аннотация.** В работе рассматривается задача локализации антропогенных источников выбросов загрязняющих веществ. Построена математическая модель, позволяющая на основе данных ветрового зондирования атмосферы определять координаты антропогенных источников загрязнения, величина выбросов которых превышает установленные нормы.

**Ключевые слова:** локализация; источник загрязнения; обратный перенос.

**Annotation.** In the paper consider the problem of localization of anthropogenic sources pollutant emissions. A mathematical model, based on the data wind sounding of the atmosphere to determine the coordinates of the anthropogenetic sources of pollution, the amount of emissions that exceed the norm.

**Keywords:** localization; the source of contamination; reverse shift.

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема охраны окружающей среды является крайне наукоемкой и является предметной областью ряда научных направлений (экология, метеорология, дистанционное зондирование атмосферы и т.д.). Она требует большого объема экспериментальных исследований, направленных на мониторинг состояния окружающей среды, а также сложных теоретических исследований, целью которых является повышение адекватности разрабатываемых моделей, позволяющих, в частности, локализовать источники загрязнений, дать количественную оценку скорости выделения загрязнителей. Задача локализации источников загрязнения является актуальной, так как ее решение позволяет установить вклад отдельных источников (предприятия, города, страны) в загрязнение воздуха или почвы в конкретной географической точке. Это необходимо учитывать при вводе новых промышленных предприятий и управлении выбросами существующих, чтобы суммарное

их количество не превышало установленных норм [1].

Таким образом, целью работы является повышение адекватности по результатам проб воздуха и с использованием информации о погоде локализации местоположения аномального источника выбросов загрязняющих веществ, величина которого превышает установленные нормы.

Для определения возможных источников загрязнения в мировой практике используются методы [2, 3], в основе которых лежит решение обратных задач переноса примеси, которые позволяют по ограниченному числу точек наблюдений восстановить параметры источников и поля аэрозольного загрязнения местности. В этих методах часто используются уравнения гидродинамики, которые являются нелинейными в частных производных, требуют значительных усилий, как для аналитического исследования, так и для численного решения.

В работе предлагается взять за основу подход, обеспечивающий локализацию источников выбросов загрязняющих веществ станциями контроля, используя данные ветрового зондирования атмосферы.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Постановка соответствующей задачи состоит в следующем.

Пусть в режиме нормальной работы промышленных предприятий концентрация  $C_{j\text{пост}}$   $j$ -ой примеси в любой из  $m$  точек контролируемой территории с учетом фоновой концентрации  $C_{j\text{фон}}$  не превышает значение  $C_j^{\text{lim}}$  по данному веществу:  $C_{j\text{пост}} + C_{j\text{фон}} \leq C_j^{\text{lim}}$ ,  $j = 1, \dots, m$ . При этом известны координаты  $n$  источников загрязнения  $(x_i, y_i, h_i)$ , а также величина выброса  $\tilde{N}_i^{\text{lim}}$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Кроме того, известны координаты расположения пеленгующего поста  $(X, Y, Z)$ , на котором производится измерение значений концентраций веществ  $C_{j\text{пост}}$ , а также измерение горизонтального направления ветра  $\varphi_r$  и его горизонтальной скорости  $v_r$ . Влияние степени устойчивости (неустойчивости) атмосферы, связанной с ее температурной стратификацией оценивается отдельно.

Величина  $C_{j\text{пост}}$  характеризует суммарную концентрацию  $j$ -ой примеси от одновременно работающих источников выбросов и фоновой концентрации  $C_{j\text{фон}}$ .

Для обработки имеющейся информации на практике применяется методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий [1]. Данная методика позволяет рассчитать концентрацию загрязняющих веществ (ЗВ) от предприятий, выбрасывающих  $j$ -ю примесь, при нормальном режиме работы и измеренном значении скорости  $v_r$  в точках с координатами расположения поста контроля в момент времени  $t$ :

$$C_j^t = C_{j\text{пост}}^t - C_{j\text{норм}}^t - C_{j\text{фон}}^t, \quad (1)$$

где  $C_{j\text{норм}}^t$  – есть значение концентрации примеси при работе источников в нормальном режиме. Из выражения (1) и предыдущих рассуждений следует, что  $C_{j\text{пост}} \leq C_j^{\text{lim}}$ , при  $j = 1, \dots, m$ .

В представленной постановке воздушный поток, обеспечивающий процесс переноса воздушной массы, рассматривается с одной стороны как средство переноса соответствующей примеси ЗВ, с другой – как источник

информации об изменениях поля ЗВ и о координатах их появления.

Согласно методу обратных траекторий переноса воздушной частицы (ВЧ), на различных уровнях в атмосфере для определенных периодов наблюдения строятся последовательные положения ВЧ за некоторый интервал времени. Построение обратных траекторий ВЧ позволяет определить, откуда пришла ВЧ в данный район. Для этого траектория откладывается от заданной точки против воздушного потока – способ обратного переноса, сущность которого заключается в следующем [4–6].

Построение траекторий производится с использованием приземной карты погоды и карт барической топографии АТ700 или АТ500. На высотах скорость ветра  $V$  значительно выше, чем у поверхности земли. Правило ведущего потока учитывает эту особенность путём введения в расчёты соответствующих коэффициентов.

Пусть необходимо определить, откуда пришла ВЧ в данный пункт (точка  $A$ ) через  $\Delta t \leq 12$  ч. (рис. 1). В районе т.  $A$  (немного позади по потоку) по карте погоды определяется средняя скорость ветра  $V$  в км/ч, затем рассчитывается расстояние (путь), на которое может сместиться ВЧ за время  $\Delta t$ :

$$l = \Delta t \cdot K_{\text{пер}} \cdot V, \quad (2)$$

где  $K_{\text{пер}}$  – коэффициент переноса между скоростью ветра у земли и на высотах.

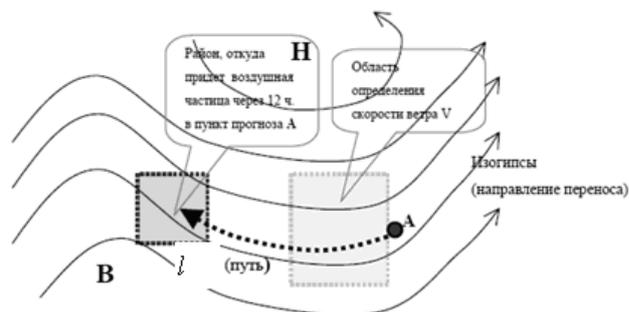


Рис. 1. Иллюстрация способа обратного переноса

Зависимость коэффициента переноса от скорости ветра на уровнях АТ700 и АТ500 представлена в таблице 1. В среднем коэффициент пропорциональности для АТ700 принимается 0.8, для АТ500 – 0.6 [4].

Таблица 1  
Зависимость коэффициента переноса от скорости ветра на высотах

Скорость потока на высотах, км/ч	Коэффициент переноса для уровней	
	АТ700	АТ500
≥ 30	1.5	1.2
30–35	1.2	1.0
35–45	1.0	0.8
45–55	0.8	0.7
55–85	0.7	0.6
85–100	0.6	0.4

Смещаясь от т. А против потока на расстоянии  $l$ , примерно параллельно изогипсам карты АТ, а на приземной карте – между изобарой и направлением ветра, начальная точка траектории укажет район из которого через время  $\Delta t$  сместится воздушная частица в данный пункт.

Если  $\Delta t \geq 12$  ч., то расчёты производятся по двум картам – прогностической и фактической. Сначала рассчитывается, как указано выше, путь частицы  $l_1$  за время  $\Delta t - 12$  ч. Затем по прогностической карте, смещаясь от т. А на путь  $l_1$  назад по потоку, в конце траектории  $l_1$  ставится т. А<sub>1</sub>. Точка А<sub>1</sub> переносится на фактическую карту погоды и аналогичным образом рассчитывается путь частицы  $l_2$  за оставшееся время.

От т. А<sub>1</sub> на фактической карте погоды, смещаясь против потока примерно параллельно изогипсам на расстояние  $l_2$ , обозначается начало траектории – т. А<sub>2</sub>. Начальная точка траектории А<sub>2</sub> на фактической карте погоды укажет район, из которого через время  $\Delta t \geq 12$  ч. сместится воздушная частица в данный пункт.

Характер изменчивости параметров ветра существенным образом зависит от типа синоптической ситуации, поэтому в зависимости от типа синоптической ситуации, коэффициент переноса между скоростью ветра у земли и на высотах  $K_{пер}$ , предлагается использовать в виде уточненного коэффициента  $K_{пер}^* = K_{пер} \cdot W$ , где  $W$  – коэффициент, характеризующий синоптическую ситуацию.

К основным типам синоптических ситуаций относятся:

1. Передняя часть циклона.
2. Теплый сектор циклона.
3. Тыловая часть циклона.
4. Западная (восточная) периферия антициклона.
5. Ложбина.
6. Гребень.
7. Малоградиентное барическое поле.

На рис. 2 представлены синоптические ситуации 1–3, на рис. 3 – синоптическая ситуация 4, на рис. 4 – синоптические ситуации 5–7.

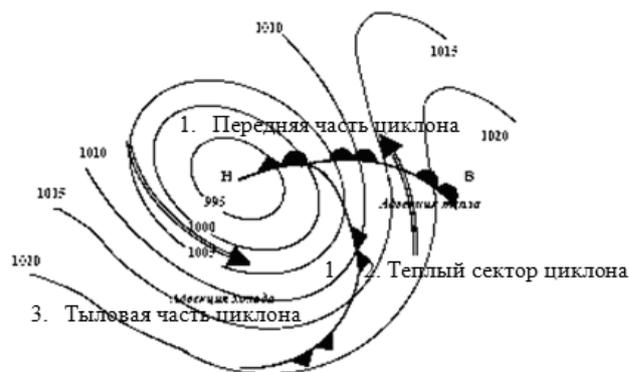


Рис. 2. Иллюстрации передней, тыловой частей и теплового сектора циклона

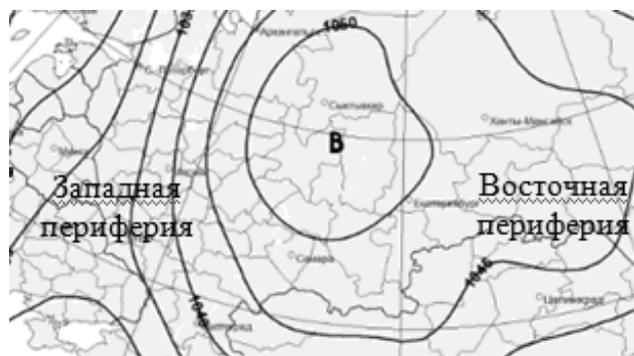


Рис. 3. Иллюстрация западной и восточной периферии антициклона

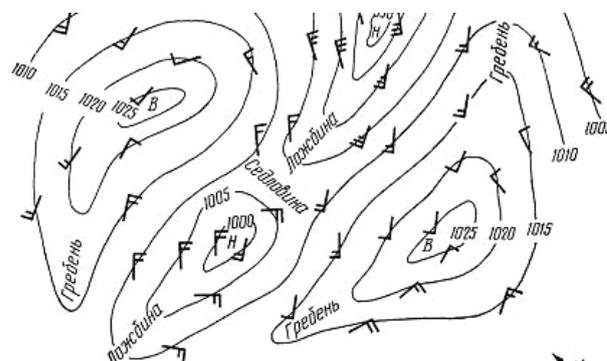


Рис. 4. Иллюстрация гребня, ложбины и малоградиентного барического поля

В зависимости от типа синоптической ситуации, на базе соответствующих статистических данных предлагается использовать следующие значения коэффициента  $W$  :

1. Передняя часть циклона – 1,00.
2. Теплый сектор циклона – 0,95.
3. Тыловая часть циклона – 1,05.
4. Западная (восточная) периферия антициклона – 0,90.
5. Ложбина – 0,85.
6. Гребень – 0,80.
7. Малоградиентное барическое поле – 0,70.

Для уменьшения погрешности в определении оценки параметров ветра, в работе приняты во внимание микроклиматические особенности ветрового режима на отдельных участках территории с учетом местных особенностей. Рельеф местности вызывает изменение воздушных течений, господству-

ющих над относительно ровными участками территории. Поэтому при расчете параметров ветра, для каждого района необходимо использовать поправочные коэффициенты, получаемые из анализа ряда характеристик (рис. 5).

При расчете поправочных коэффициентов необходимо принять во внимание следующее. Установлено [4], что действительный ветер у поверхности земли отклоняется от направления изобар в сторону низкого давления и имеет скорость меньше скорости градиентного ветра. В среднем, угол отклонения ветра от изобар составляет над морем  $15^\circ$ , над сушей на равнине  $30^\circ$  и на холмистой местности  $45^\circ$ . Скорость действительного ветра над морем составляет 0.7–0.8 скорости градиентного ветра, а над сушей 0.5–0.6. Суточный ход скорости ветра наиболее выражен летом на материке при безоблачной по-

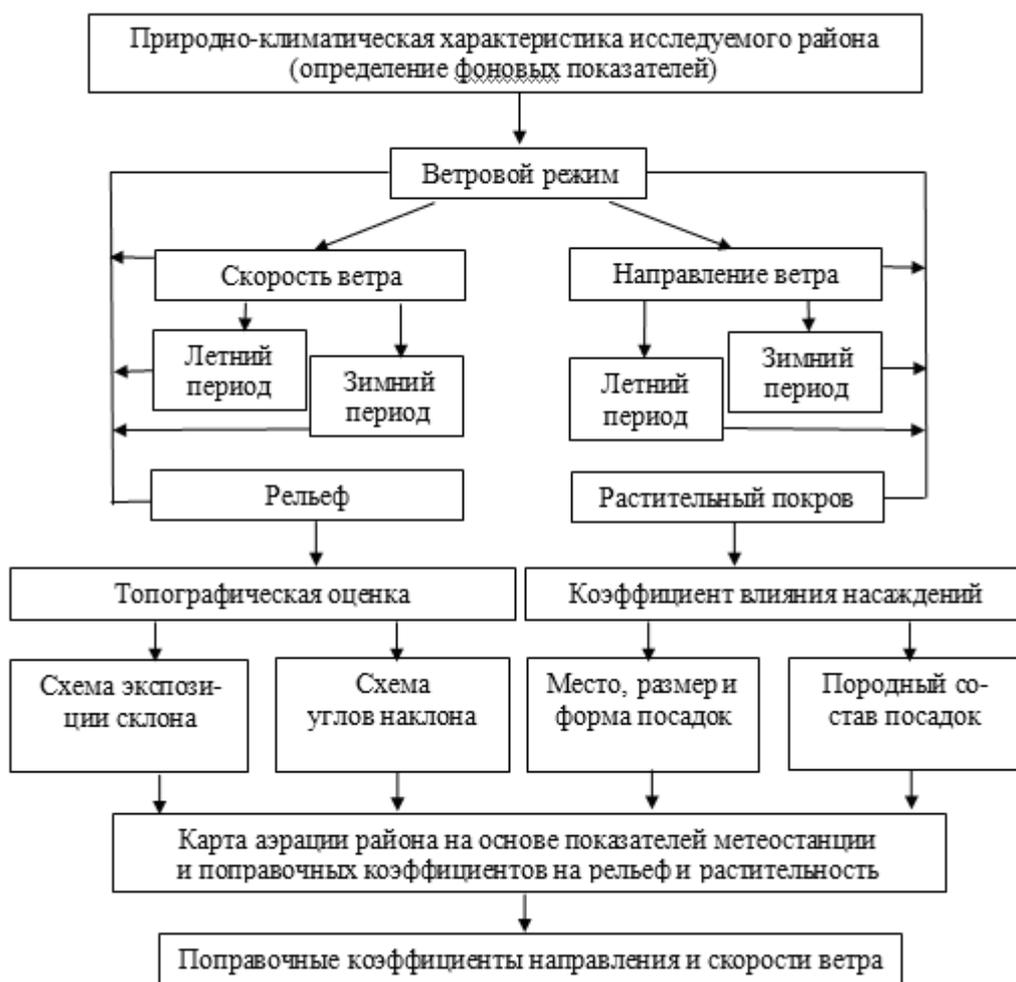


Рис. 5. Характеристики и последовательность учета микроклиматических особенностей ветрового режима

годе, особенно в южной и западной частях антициклона. При этом барические градиенты могут быть весьма небольшими и не испытывать существенных изменений от ночи ко дню.

Летом на юге Европейской территории России в дневные часы, когда вертикальный градиент температуры в нижнем километровом слое приближается к 1 град. на 100 м, скорость ветра при барических градиентах около 2 мб на 1 град меридиана достигает скорости градиентного ветра. В случае сильного перегрева, скорость действительного ветра может превышать скорость градиентного ветра в два-три раза. Ночью при образовании приземных инверсий, при малых барических градиентах скорость действительного ветра в два-три раза слабее скорости градиентного. Зимой и ранней весной, когда приземные инверсии имеют большую вертикальную мощность и почти не разрушаются в дневное время, скорость ветра как ночью, так и днем приблизительно в два раза меньше градиентной.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предложенный подход, основанный на методе обратных траекторий переноса воздушных масс обеспечивает достаточно точное определение перемещение воздушными массами веществ, загрязняющими атмосферу и позволяет с достаточной для практики точностью локализовать источники загрязнения.

С формальной точки зрения модель, позволяющая на основе данных ветрового зондирования атмосферы определять координаты антропогенных источников загрязнения, величина выбросов которых превышает установленные нормы, наряду с выражениями (1) и (2) представляется следующим образом.

Среднее направление ветра  $\varphi^r$  по траектории перемещения воздушной частицы определяется как:

$$\overline{\varphi^r} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varphi_i^r, \quad (3)$$

где  $\varphi_i^r$  – текущее значение направления ветра,  $N$  – число измерений.

Однако, поскольку регистрация значений  $\varphi_i^r$  происходит дискретно и неограниченно долго с интервалом  $\Delta t$ , вместо выражения (3) целесообразно использовать:

$$\overline{\varphi^r}(N) = (1 - \alpha) \overline{\varphi^r}(N-1) + \alpha \varphi^r(N), \quad (4)$$

где  $\overline{\varphi^r}(N)$  – оценка среднего значения направления ветра к  $N$ -му такту измерений;  $\varphi^r(N)$  – измеренное в  $N$ -ом такте значение  $\varphi^r$ ,  $\alpha$  – постоянный коэффициент, определяющий устойчивость выражения (4), удовлетворяющий условию  $0 < \alpha < 2$ .

Пусть  $x = v^r \cos \varphi^r$ , где  $\varphi^r$  – угол, образованный средним направлением ветра  $\varphi^r(N)$  и текущим значением его направления на такте измерения  $N$ . Тогда значение концентрации примеси в момент времени  $t$  будет описываться линейной регрессионной моделью вида:

$$C_j^t = \sum_{k=0}^{\infty} a_k x_{t-k} + \tau, \quad (5)$$

где  $a_k$  – неизвестная константа;  $\tau$  – независимая от  $x_{t-k}$  случайная переменная с нулевым средним значением и единичной дисперсией.

Выражение (5) описывает распределенное во времени влияние величины  $x$  на концентрацию  $C$  и относится к моделям распределенного лага. В распределенности значений  $x_{t-k}$  заключается память обо всех искривлениях линий тока поля ветра, влияющих в рамках рассматриваемой задачи на концентрацию поля примеси. Поскольку выражение (5) содержит бесконечное число слагаемых, то идеально оценить величину  $C_j^t$  невозможно. Поэтому по известному расстоянию  $l$  от пеленгующего поста до самой дальней границы расположения источников загрязнения и среднему значению скорости ветра  $v^r$  определяется продолжительность лага  $k$ :

$$k = \frac{l}{v^r \Delta t}. \quad (6)$$

В связи с тем, что временные ряды  $C_i$ ,  $x_i$  являются случайными, оценку параметра  $a_i$  предлагается осуществить с помощью рекуррентной процедуры, основанной на методе наименьших квадратов:

$$a_{i+1} = a_i + \gamma_i P_{i+1} x_i (C_i - x_i^T a_i),$$

$$P_{i+1} = P_i (I - x_i (x_i^T P_i x_i + 1)^{-1}) \gamma_i x_i^T P_i, \quad (7)$$

где  $\gamma_i$  – функция переключения, имеющая вид:

$$\gamma_i = 1, \text{ если } \frac{(C_i - C_{i+1})^2}{1 + x_i^T P_{i-1} x_i} > \Delta,$$

в противном случае  $\gamma_i = 0$ . (8)

Здесь  $C_i = x_i^T a_i$ ,  $I$  – единичная матрица;  $\Delta$  – допустимая погрешность модели;  $P(0) = I \cdot 10^R$ ,  $a_0 = [0, 0, \dots, 0]^T$ ;  $T$  – знак транспонирования.

Функция (8) обеспечивает сохранение оценки параметров модели  $a$  постоянными, пока ошибка прогноза  $(C_i - C_{i+1})$  оказывается больше установленного уровня.

Практическое использование выражения (8) предполагает накопление статистики значений  $C_i$ ,  $x_i$ .

Процедура вычисления оценок  $a_i$ , выполняется при каждом получении новых значений  $C_i$ ,  $\varphi^r$ ,  $v^r$ . При этом получается вектор вида  $a_i = [a_{0i}, a_{1i}, \dots, a_{ki}]^T$ .

Процесс построения линейной регрессионной модели (5) считается законченным, если  $\gamma = 0$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, используя модель состояния концентраций примеси в зависимости от прошлых и настоящих значений направления и скорости ветра, задачу локализации антропогенных источников загрязнения, величина выбросов которых превышает установленные нормы предлагается решать следующим образом.

Пусть пост в некоторый момент времени  $t$  регистрирует значение  $C_j \geq C_j^{\text{lim}}$ . В такой ситуации какой-то источник выбросов нарушил нормативы. Из адекватности модели следует отбор значимых членов ряда  $\sum a_k x_{t-k}$ , т.е. становится известной «глубина памяти»

$k$ . В отличие от начального значения, определенного по формуле (6), вновь найденное значение  $k$  в задаче локализации позволяет определить время переноса примеси от источника до поста контроля. При этом координаты расположения источника предлагается определить следующим образом: для заданного значения  $k$  и известных величин  $v_0^r, v_1^r, \dots, v_k^r$ , путь  $l$ , пройденный частицами примеси от источника до поста, определяется как:

$$l = \Delta t \sum_{i=1}^k v_i^r \cos \varphi_i^r. \quad (9)$$

Величину  $l$  необходимо отложить в противоположном направлении среднего направления ветра. Таким образом, зная среднее направление ветра и «глубину переноса» примеси  $l$ , довольно точно локализуется предприятие – источника выбросов, величина которых превышает установленные нормы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьев К. Я. (ред.) Аэрозоль и климат. – Л. : Гидрометеиздат, 1991, 541 с.
2. Samson P. J. Trajectory Analysis of Summer-time Sulfate Concentrations in the Northeastern United States // Journal of Applied Meteorology. – 1980. – V. 19. – P. 1382–1394.
3. Dorling S. R., Davies T. D., Pierce C. E. Cluster analysis: a technique for estimating the syn-optic meteorological controls on air and precipitation chemistry – method and applications // Atmospheric Environment. – 1992. – V. 26. – P. 2575–2581.
4. Воробьев В. И. Синоптическая метеорология. – Л. : Гидрометеиздат, 1991, 540 с.
5. Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. – СПб. : Гидрометео-издат, 2000, 640 с.
6. Семенченко Б. А. Физическая метеорология. – М. : Аспект-Пресс, 2002. – 415 с.

**Гедзенко Максим Олегович** – аспирант, Воронежский ГАСУ.  
Тел.: 8-952-540-61-76  
E-mail: MOGEDZ@mail.ru

**Gedzenko Maxim Olegovich** – graduate student, Voronezh GASU  
Tel.: 8-952-540-61-76  
E-mail: MOGEDZ@mail.ru

**Доронина Екатерина Геннадьевна** – кандидат технических наук, преподаватель 11 кафедры, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж)  
Тел.: 8-920-4025447  
E-mail: GEDOR@pochta.ru

**Doronina Ekaterina Gennadevna** – The teacher of 11 dept. Theoretical Hydrometeorology, Military Educational Research Centre of Air Force «Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin» (Voronezh)  
Tel.: 8-920-4025447  
E-mail: GEDOR@pochta.ru

**Самсонов Александр Васильевич** – преподаватель 11 кафедры теоретической гидрометеорологии, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж)  
Тел.: 8-951-5440280  
E-mail: sinoptik78@mail.ru

**Samsonov Alexandr Vasilevich** – The teacher of 11 dept. Theoretical Hydrometeorology, Military Educational Research Centre of Air Force «Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin» (Voronezh)  
Tel.: 8-951-5440280  
E-mail: sinoptik78@mail.ru