

*С. А. Чигридов<sup>1</sup>, Е. Н. Кулик<sup>1</sup>✉*

## **Прогнозирование ветровых условий для оценки концентраций загрязнений от стационарных источников**

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет геосистем и технологий,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследования пространственно-временной динамики ветрового режима с использованием современных методов анализа данных. Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения преобладающих направлений ветра для решения задач экологического мониторинга, оценки переноса загрязняющих веществ и планирования градостроительной деятельности. Основной целью исследования являлся анализ статистических характеристик ветрового режима на основе обработки массива данных, полученных с метеорологического сервиса. Для решения поставленных задач была разработана программа на языке Python, позволяющая визуализировать данные распределения в виде розы ветров, рассчитывать векторы направления преобладающих воздушных потоков. Методология исследования включала сбор первичных данных о направлении и скорости ветра, их статистическую обработку с расчетом векторных характеристик, а также визуализацию результатов с построением комплексных графиков. В результате проведенного анализа получены количественные оценки преобладающих направлений ветра, определены характерные векторы переноса воздушных масс. Установлено, что предложенная методика позволяет с точностью 83 % определять основные закономерности ветрового режима и распространения загрязнения, что подтверждается сопоставлением с данными инструментальных наблюдений. Результаты исследования важны для оценки состояния окружающей среды, моделирования перемещения вредных примесей, а также полезны при разработке стратегий освоения территорий. Разработанный программный инструмент демонстрирует высокую эффективность при обработке метеорологических данных и может быть адаптирован для решения более широкого круга задач.

**Ключевые слова:** анализ направления ветра, метеорологические данные, программа для анализа ветра, прогнозирование рассеивания примесей

*S. A. Chigridov<sup>1</sup>, E. N. Kulik<sup>1</sup>✉*

## **Wind conditions' prediction to assess pollution concentrations from stationary origins**

<sup>1</sup>Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation  
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

**Abstract.** The article presents the results of a study of the spatial and temporal dynamics of the wind regime using modern data analysis methods. The relevance of the work is due to the need to study the prevailing wind directions in order to solve the problems of environmental monitoring, assessment of pollutant transport and planning of urban development activities. The main purpose of the study was to analyze the statistical characteristics of the wind regime based on the processing of the data array obtained from the meteorological service. To solve these tasks, a Python program was developed that allows visualizing the distribution data in the form of a wind rose and calculating the direction vectors of the prevailing air currents. The research methodology included the collection of primary data on the direction and speed of the wind, their statistical processing with the calculation

of vector characteristics, as well as visualization of the results with the construction of complex graphs. As a result of the analysis, quantitative estimates of the prevailing wind directions were obtained, and characteristic vectors of air mass transfer were determined. It has been established that the proposed technique allows to determine the basic patterns of the wind regime and the spread of pollution with an accuracy of 83 %, which is confirmed by comparison with the data of instrumental observations. The results of the research are important for assessing the state of the environment, modeling the movement of harmful impurities, and are also useful in proposal strategies for the territorial development. The created software tool demonstrates high efficiency in processing meteorological data and can be adapted to solve a wider range of tasks.

**Keywords:** wind direction analysis, meteorological data, wind analysis software, prediction of impurity dispersion

### *Введение*

Одним из элементов разрабатываемой информационной системы поддержки принятия решений (ППР) по развитию пригородных территорий является модуль пространственного моделирования распространения загрязнений и расчета концентрации загрязняющих веществ. Определение областей, подверженных загрязнению, выполняется с помощью модели Паскуилла-Гиффорда [1], в которой используются данные об объемах выбросов и координаты вектора направления ветра. Прогнозировать объемы выбросов не представляется возможным, так как множество факторов влияет на них (увеличение потребителей, температура окружающей среды, нагрузка промышленных производств и т.п.). В связи с этим было принято решение о прогнозировании ветровых условий, чтобы оценивать территории, которые потенциально подвержены загрязнению.

### *Методы и материалы*

Для формирования прогнозного набора данных необходимо обработать и проанализировать данные за предыдущие годы наблюдения ветровой истории. Исходные данные о направлении ветра по месяцам были собраны за период с 2000 по 2023 гг. с сервиса GISMETEO [2]. По каждому из восьми основных направлений суммировалось количество дней в месяце, когда наблюдалось соответствующее направление ветра. Полученные данные были систематизированы в виде таблицы (табл. 1).

*Таблица 1*

Данные о направлении ветра за июль месяц

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
В	1	1	4	4	1	4	3	5	0	5	2
СВ	2	4	4	3	4	3	5	8	5	4	3
С	7	4	5	8	8	4	5	3	7	4	10
СЗ	6	1	6	6	5	6	0	1	2	1	3
З	3	10	3	2	2	1	3	0	6	3	1
ЮЗ	3	2	5	1	3	3	7	3	3	3	5
Ю	4	7	1	5	2	8	7	10	7	8	6
ЮВ	2	1	2	2	4	0	1	1	0	2	0

Критерии выделения климатически значимых ветровых режимов основаны на статистическом анализе 24-летнего периода наблюдений. Для каждого месяца и соответствующего направления были рассчитаны медиана ( $\mu$ ) и стандартное отклонение ( $\sigma$ ), формирующие диапазон изменчивости ( $\mu \pm \sigma$ ). Данный подход позволит учесть различную природную вариабельность и выделить статистически значимые аномалии (табл. 2).

Таблица 2

Рассчитанные значения диапазона для июля месяца

	$\mu$	$\sigma$	$\mu - \sigma$	$\mu + \sigma$
С	4,74	4,69	0,05	9,42
СВ	3,70	3,14	0,55	6,84
В	4,48	4,86	0,00	9,34
ЮВ	4,35	4,09	0,26	8,44
Ю	3,91	4,15	0,00	8,06
ЮЗ	3,30	2,60	0,71	5,90
З	4,04	4,39	0,00	8,43
СЗ	1,61	1,75	0,00	3,36

В процессе расчета  $\mu - \sigma$  получались отрицательные значения. Такая ситуация возникает в случае, когда стандартное отклонение больше или сопоставимо с медианным значением ( $\sigma \geq \mu$ ). Так как количество дней ( $N$ ) находится в диапазоне  $0 - N_{max}$ , все отрицательные значения были приравнены нулю.

Для получения координат векторов направления ветра для рассчитанных значений были построены розы ветров, рассчитаны их центры масс и построены векторы преобладающего направления ветра (рис. 2, 3). Использовалась усовершенствованная версия программы для построения роз ветров [3]. В отличие от предыдущей версии программы, обновленная:

- позволяет загружать исходные данные не только вручную, но и из текстовых CSV-файлов;
- имеет возможность строить n-роз ветров на одном графике;
- инвертирует и сохраняет координаты вектора направления ветра в txt-файл (необходимые переменные для расчета модели);
- строит график с векторами направления ветра (для визуальной оценки);
- рассчитывает угол разброса загрязняющих веществ и строит границы области распространения загрязнения;
- сохраняет график с розами ветров, график с векторами и таблицу с рассчитанными данными в PDF-файл (отчетный файл).

При проведении исследования [2] эмпирически была выявлена зависимость ширины области загрязнения от длины вектора направления ветра. Чем стабильнее был ветер, тем больше евклидово расстояние вектора, тем уже область за-

грязнения и наоборот. Следовательно, не смотря на отклонение контрольной области от прогнозных, они могут и/или будут пересекаться.

Для проверки пересечения контрольной области загрязнения с рассчитанными, в программу была интегрирована формула:

$$L = \frac{1000 \times D + 180,0087}{0,342 \times D^3 + 4,756 \times D^2 + 6,3228 \times D + 1}, \quad (1)$$

где  $L$  – угол распространения загрязнения;  $D$  – евклидово расстояние, рассчитанное по координатам центра масс

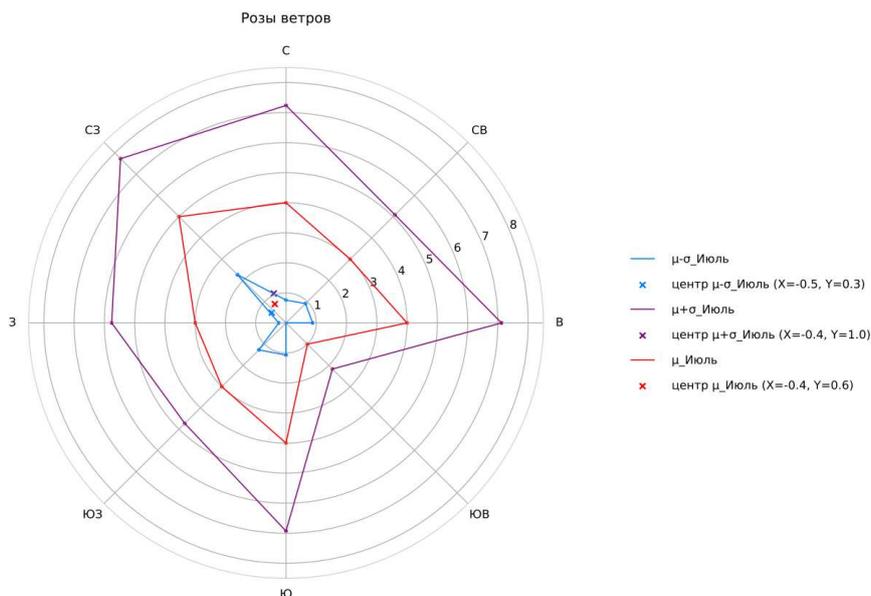


Рис. 2. Розы ветров и их центры масс по рассчитанным значениям для июля месяца

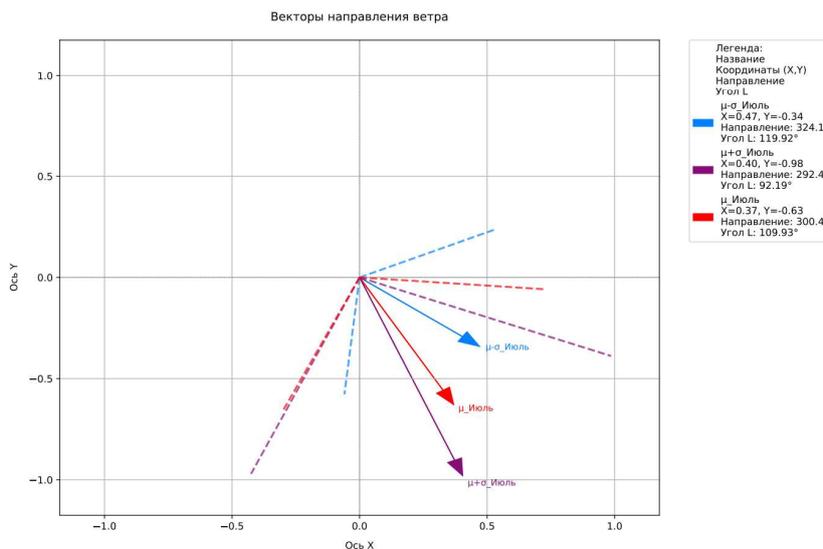


Рис. 3. Векторы направления ветра по рассчитанным значениям для июля месяца

В табл. 3 представлены рассчитанные и инвертированные данные для июля месяца. Угол направления считается от восточного направления против часовой стрелки.

Таблица 3

Рассчитанные и инвертированные данные за июль месяц

Название розы ветров	Рассчитанные координаты		Угол направления	Инвертированные координаты		Угол направления инвертированный
	X	Y		X	Y	
$\mu+\sigma$	-0,47	0,34	144,1	0,47	-0,34	324,1
$\mu$	-0,40	0,98	112,4	0,40	-0,98	292,4
$\mu-\sigma$	-0,37	0,63	120,4	0,37	-0,63	300,4

Расчетные данные будут соответствовать действительности в случае, если вектор контрольного направления ветра и угловой «коридор» его евклидова расстояния будет располагаться между прогнозными значениями направления и угла евклидова расстояния для значения « $\mu-\sigma$ » и « $\mu+\sigma$ ». В иных случаях необходимо оценивать степень отклонения по обоим значениям.

### Результаты

Для оценки точности прогнозирования были собраны данные за 2024 год и построены розы ветров (рис. 4) и векторы направления ветра (рис. 5).

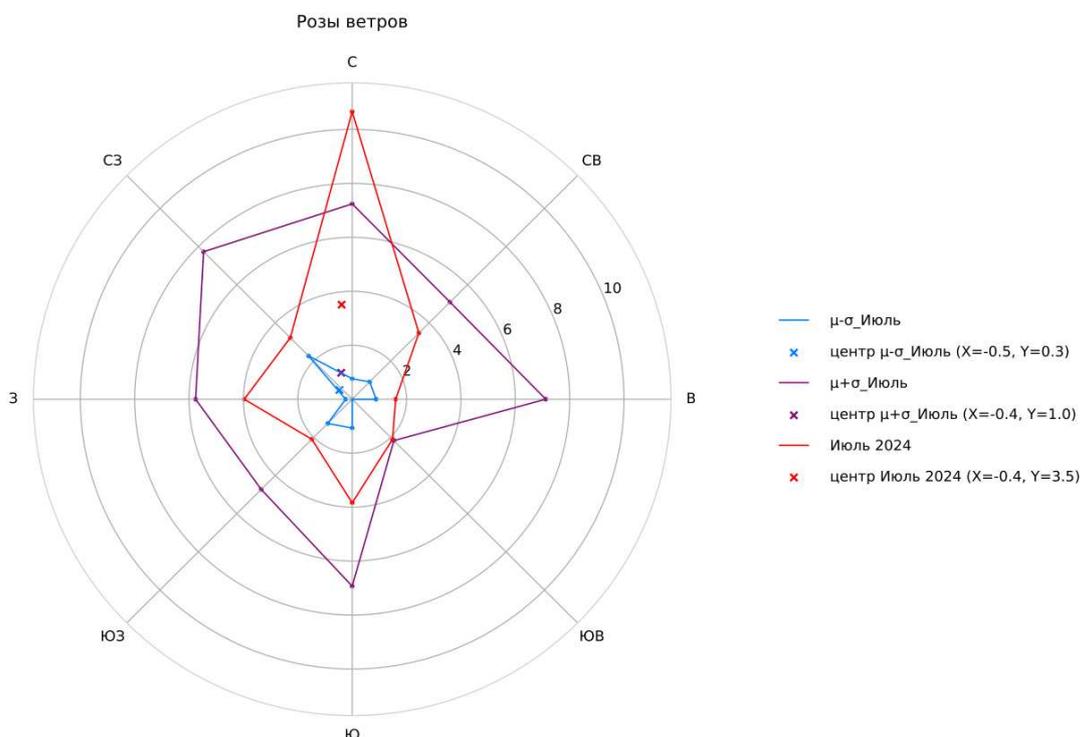


Рис. 4. Розы ветров по рассчитанным и контрольным данным для июля месяца

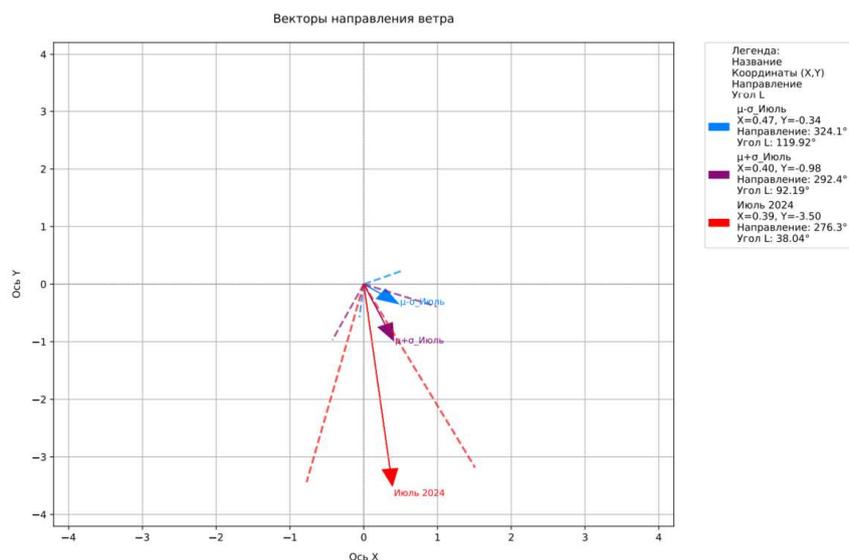


Рис. 5. Векторы направления ветра по рассчитанным и контрольным данным для июля месяца

Из рис. 5 видно, что контрольное направление вектора не входит в диапазон рассчитанных значений, однако контрольная область распространения загрязнения находится в диапазоне рассчитанных.

### Обсуждение

Для проверки точности прогнозирования были построены розы ветров и векторы направления для остальных месяцев и сформирована сводная таблица (табл. 4) в которой:

- мес. – месяц;
- $L_{get}$  – вхождение значения угла вектора в рассчитанный диапазон (да/нет);
- $L_{grad}$  – отклонение угла вектора направления ветра от диапазона (градусы);
- $Area_{get}$  – вхождение значения области распространения загрязнения в рассчитанный диапазон (да/нет);
- $Dev_{per}$  – процент отклонения контрольной области загрязнения от прогнозных данных (%).

Таблица 4

### Оценка точности прогнозирования

мес.	$L_{get}$	$L_{grad}$	$Area_{get}$	$Dev_{per}$
1	нет	6,2	нет	18,4
2	нет	11,5	нет	9,6
3	да	0	да	0,0
4	нет	15,1	нет	26,2
5	да	0	да	0,0

6	да	0	да	0,0
7	нет	16,1	да	0,0
8	нет	76,4	нет	33,5
9	нет	57,9	нет	59,2
10	нет	11,2	нет	39,1
11	нет	7,9	да	0,0
12	нет	4,2	да	0,0

Результат прогнозирования:

- 50 % – допустимое отклонение вектора направления ветра и полное совпадение контрольной области загрязнения с рассчитанными диапазонами;
- 33 % – допустимое отклонение вектора направления и области загрязнения контрольных значений от рассчитанных диапазонов;
- 17 % – критическое отклонение вектора направления; критическое смещение контрольной области.

Итоговая точность прогнозирования пары «направления ветра/область загрязнения» с допущением отклонения областей распространения загрязнения в пределах 0–40 % от рассчитанного диапазона и при отклонении угла направления ветра в пределах 0–16 градусов, составляет – 83 %.

### *Заключение*

Проведенное исследование позволило получить готовый инструмент для автоматизированного анализа и прогнозирования ветрового режима и, следовательно, зависимо от него распространения загрязнения от точечных источников (ТЭЦ). Основные результаты показали, что используемый подход обработки данных позволяет прогнозировать направление загрязнения и область его распространения с точностью 83 %.

Перспективой дальнейших исследований является совершенствование точности прогнозов за счет внедрения нейронных сетей и применения модели ARIMA [4, 5], а также увеличения объема статистической выборки. Разработанный подход применим к различным регионам, что делает его универсальным в общей системе поддержки принятия решений при проектировании развития пригородных территорий.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Atmospheric Dispersion Modeling. [Electronic resource] // University of Washington. – URL: <https://faculty.washington.edu/markbenj/CEE357/CEE%20357%20air%20dispersion%20models.pdf>
2. Чигридов С. А., Кулик Е. Н. Геопространственное моделирование при оценке территорий для жилого строительства // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 2. – С. 135–143. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-2-135-143.
3. Дневник погоды [Электронный ресурс] // ГИСМЕТЕО. – URL: <http://www.gismeteo.ru/diary/4690/>

4. Модель Python | ARIMA для прогнозирования временных рядов [Электронный ресурс] // GeeksforGeeks. – URL: <https://www.geeksforgeeks.org/python-arima-model-for-time-series-forecasting/>

5. Орлов Д. В. Разработка и исследование методов предиктивного управления мощностью ветроэлектростанций в электроэнергетических системах : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук – ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет». URL: [https://www.nstu.ru/files/dissertations/dissertaciya\\_orlov\\_168595711145.pdf](https://www.nstu.ru/files/dissertations/dissertaciya_orlov_168595711145.pdf)

© С. А. Чигридов, Е. Н. Кулик, 2025