

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ С УЧЕТОМ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЫ ГОРОДА

Л. М. Акимов, П. М. Виноградов, Е. Л. Акимов

*Воронежский государственный университет, Россия*

*Поступила в редакцию 25 сентября 2014 г.*

**Аннотация:** В статье исследовано влияние состояний атмосферы на формирование полей загрязняющих веществ. Проведена оценка экологической обстановки в городском округе город Воронеж.

**Ключевые слова:** атмосфера, экология, индекс загрязнения атмосферы, вертикальный градиент температуры.

**Abstract:** The article provides the studies of atmosphere state influence over formation of contaminant areas. The assessment of environmental situation inside the urban district of Voronezh City is represented in the article.

**Key words:** atmosphere, ecology, air pollution index, the vertical temperature gradient.

Загрязнение атмосферного воздуха антропогенными примесями, поступающими от промышленных предприятий, топливно-энергетических объектов, аграрного комплекса, транспорта, достигло уровня, угрожающего сохранению экологического равновесия природной среды [6], поэтому усовершенствование системы экологического мониторинга состояния атмосферного воздуха приобретает все более актуальное значение.

Теоретические подходы к изучению данной проблемы обоснованы во многих трудах отечественных и зарубежных ученых по урбоэкологии, экологической климатологии и мониторингу окружающей среды, таких как К. С. Буштуева [3], Э. Ю. Безуглая [4, 5, 6], М. Е. Берлянд [7, 8], Ю. А. Израэль [12], А. А. Исаев [13], I. Turiel [25], R. Wilson [26] и другие.

На территории города Воронеж ранее выполнен ряд аналитических исследований по оценке качества городской среды обитания, в том числе по изучению роли аэрогенного фактора в формировании зон экологического риска (М. И. Чубирко [24], Н. П. Мамчик, О. В. Клепиков с соавторами [9], Костылева Л. Н. [14]).

Активное участие в развитии данной тематики принимают сотрудники факультета географии, геоэкологии и туризма ВГУ Л. М. Акимов [1, 2],

С. А. Епринцев с соавторами [11], С. А. Куролап [15-19], А. В. Назаренко [20-22], В. И. Федотов [9], которые показали существенный вклад автотранспорта в уровень загрязнения воздушного бассейна, возможность прогноза загрязнения воздуха по метеорологическим параметрам, а также приоритетную роль аэрогенного фактора в формировании общественного здоровья.

В то же время не проводилось детального изучения особенностей сезонной динамики загрязнения воздушного бассейна с учетом влияния функционально-планировочной структуры города и пространственной структуры атмосферы на формирование полей аэрогенного загрязнения. Анализ загрязнения воздушного бассейна города осуществлялся в основном с учетом использования метеорологических параметров у поверхности земли.

Необходимость использования данных вертикальной структуры атмосферы с целью прогнозирования экологической обстановки обоснована в работах М. Е. Берлянда [8], А. В. Назаренко [23], Л. М. Акимова [2].

В представленной работе проведен анализ сезонной динамики концентрации загрязнения воздушного бассейна Воронежа в зависимости от состояния атмосферы и структуры города.

Современный Воронеж – индустриально-развитый город. Его территория делится на две неравные части акваторией Воронежского водохра-

нилища. Правобережная часть города представляет собой высокое холмистое суглинистое плато с абсолютными отметками высот от 100 до 160 м и крутым коренным склоном длиной около 35 м, обрывающимся к водохранилищу. Левобережная часть – пониженная выровненная поверхность 2-ой надпойменной песчаной террасы реки Воронеж (абсолютные отметки высот – 100-130 м), поднимающаяся над урезом воды в водохранилище на 10-20 м.

Правобережный и Левобережный планировочные районы резко различаются по структуре и архитектурно-композиционному построению. Правобережная часть города компактна, а в ее построении прослеживаются черты радиальной планировки.

В составе жилого фонда около 80 % приходится на многоэтажную, а 20 % – на низкоэтажную застройку. Площадь промышленных и коммунально-складских зон составляет около 7 % территории.

На территории города исторически сложилось два промышленно-производственных массива. Один находится в левобережной части Воронежа и включает комплекс промышленных объектов: ВОГРЭС, Воронежский авиационный завод, Воронежский шинный завод, завод Воронежсинтезкаучук, завод Рудгормаш. Другой крупный промышленный массив расположен на правобережной части города, где расположены ТЭЦ-2 и заводы преимущественно машиностроительного, радиотехнического и строительного профиля.

Центральную часть города пересекает железнодорожная магистраль запад-восток, а другая железнодорожная линия север-юг проходит по всему левобережному сектору города [10].

В качестве исходных данных в работе использованы результаты ежедневных наблюдений за концентрацией загрязняющих веществ в атмосфере 5 стационарными станциями государственной службы наблюдений № 1, 7, 8, 9, 10 города, а также аэросиноптический материал за 2012-2013 годы. Ответственным за сеть наблюдательных станций, является ФГУ «Курский областной центр по гидрометеорологии и мониторингу загрязнения окружающей среды» межрегионального территориального управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Центрально-Черноземных областей. Сеть работает в соответствии с требованиями РД 52.04.186-89. Станции подразделяются на «промышленные», вблизи предприятий (станции 1, 8, 9, 10), и «авто», вблизи автомагистралей с интенсивным движением транспорта (станция 7). Посты наблюдения дан-

ного центра находятся по адресам: ул. Ростовская, 44 – пост наблюдения № 1; ул. Лебедева, 2 – пост наблюдения № 7; ул. Ворошилова, 30 – пост наблюдения № 8; ул. Л. Рябцевой, 51Б – пост наблюдения № 9; ул. 9 Января, 49 – пост наблюдения № 10.

В каждый случай вошли данные наблюдений концентраций по 7 антропогенным примесям (пыли (PL), сажи (SA), угарного газа (CO), оксида азота (NO), двуокиси азота (NO<sub>2</sub>), сернистого ангидрида (SO<sub>2</sub>), формальдегида (FO),) и значения метеорологических величин (температуры воздуха (*T*), относительной влажности (*f*), направления (*dd*) и скорости ветра (*v*) у земли и на высотах: 700 м (АТ – 925 гПа), 1,5 км (АТ – 850 гПа), 3,0 км (АТ – 700 гПа) и 5,5 км (АТ – 500 гПа)) за 4, 7, 13, 19 часов. Дополнительно привлечены данные о параметрах задерживающих слоев (инверсий температуры) в эти дни.

Для оценки уровня загрязнения атмосферы использовался интегральный показатель загрязнения атмосферы (ИЗА), который рассчитывался как сумма парциальных индексов загрязнения по 7 основным загрязнителям по формуле:

$$ИЗА = \sum_{j=1}^m I_{Пj}, \quad (1)$$

где *j* – порядковый номер вещества; *m* – число веществ; *I<sub>Пj</sub>* – индекс загрязнения атмосферы отдельной примесью (парциальный индекс).

Для веществ, включенных в расчет ИЗА, а также для других приоритетных загрязнителей с целью оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха города использованы Н 2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест» (2003). Классификация уровня загрязнения в зависимости от индекса загрязнения атмосферы представлена в таблице 1.

В работе Л.М. Акимова [2] установлено, что при оценке влияния на концентрацию загрязнения наиболее информативными оказались температурно-ветровые характеристики атмосферы: загрязнение атмосферы обычно возрастало с ростом температуры воздуха и снижалось в периоды усиления скорости ветра, что статистически подтверждено достоверной корреляцией, более устойчивой для скорости ветра.

Для выявления тесноты связи индекса ИЗА от состояния атмосферы был применен корреляционный анализ. Первоначально были рассчитаны ежедневные среднесуточные вертикальные градиенты температуры за 2012 год в сроки наблюдений 4, 7, 13, 19 часов, на различных уровнях от

Характеристика зон экологического риска (среднегодовые значения ИЗА)

| Степень  |                         | ИЗА        |
|----------|-------------------------|------------|
| градации | критерий                |            |
| I        | допустимый              | от 0 до 4  |
| II       | вызывающий беспокойство | от 5 до 6  |
| III      | вызывающий опасение     | от 7 до 13 |
| IV       | опасный                 | $\geq 14$  |

Таблица 2

Корреляция ИЗА с параметрами состояния атмосферы на различных уровнях

| параметр       | градиент     |          |          |          | инверсия и изотермия |              |         |         | влажность    |              |              |              |
|----------------|--------------|----------|----------|----------|----------------------|--------------|---------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                | 1000-925     | 1000-850 | 1000-700 | 1000-500 | 1000-925             | 925-850      | 850-700 | 700-500 | 1000-925     | 1000-850     | 1000-700     | 1000-500     |
| слой атмосферы |              |          |          |          |                      |              |         |         |              |              |              |              |
| корреляция ИЗА | <b>-0,29</b> | -0,06    | 0,07     | 0,05     | <b>0,38</b>          | <b>-0,16</b> | 0,06    | 0,04    | <b>-0,51</b> | <b>-0,49</b> | <b>-0,44</b> | <b>-0,41</b> |

поверхности земли (1000 гПа) до средней тропосферы (АТ – 500гПа) [2]. Объем выборки составил 1460 случаев. Также проведен анализ наличия задерживающих слоев атмосферы и расчет среднего значения относительной влажности. В этом случае объем выборки средних значений параметров составил 365 случаев, для которых достоверный порог значимости коэффициента корреляции равен 0,12. Следует отметить, что при расчете вертикального градиента температуры в случае инверсии, знак градиента отрицательный. Результаты корреляционного анализа параметров атмосферы и ИЗА представлены в таблице 2.

Из таблицы 2 следует, что значимая величина корреляционной связи ИЗА с вертикальным градиентом температуры наблюдается в слое атмосферы от поверхности земли до 700 м и составляет -0,29.

Вертикальный градиент температуры  $g$  оценивается в °С на каждые 100 м и косвенно характеризует интенсивность вертикальных движений воздуха, способствующих его перемешиванию и уменьшению индекса ИЗА у поверхности земли. В зависимости от величины вертикального градиента температуры различают три состояния атмосферы: устойчивое ( $g \leq 0,65$  °С/100 м), относительно-устойчивое ( $0,65 < g \leq 1,0$  °С/100 м) и абсолют-

но неустойчивое ( $g > 1,0$  °С/100 м) состояние. Степень устойчивости атмосферы определяет интенсивность вертикальных токов воздуха, чем неустойчивее состояние атмосферы (выше значение  $g$ ), тем интенсивнее вертикальные потоки воздуха. Поэтому знак величины корреляционной связи в данном случае отрицательный. Годовой и суточный ход вертикального градиента температуры представлен на рис. 1.

Из анализа рис. 1 следует, что вертикальный градиент температуры зависит от теплового и радиационного баланса атмосферы, в первую очередь от притока солнечной радиации. В ночное время ( $t = 00z$ ) на протяжении всего года наблюдается устойчивое состояние атмосферы с незначительными величинами вертикального температурного градиента близкого к нулю. В январе, апреле, мае, августе и сентябре среднемесячное значение вертикального температурного градиента имеет отрицательный знак, что свидетельствует о преобладании инверсий в ночное время в эти месяцы. Практически в ночное время в приземном 700 метровом слое атмосферы не наблюдается каких-либо значимых вертикальных токов, что обусловлено эффективным излучением. Незначительное увеличение среднемесячного значения вертикального

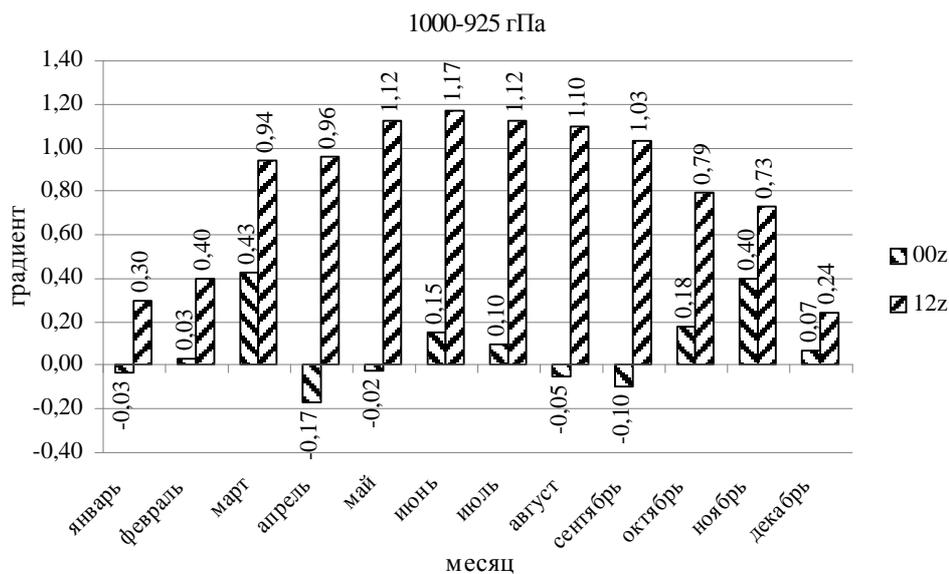


Рис. 1. Годовой ход средних месячных значений градиента температуры в ночное и дневное время

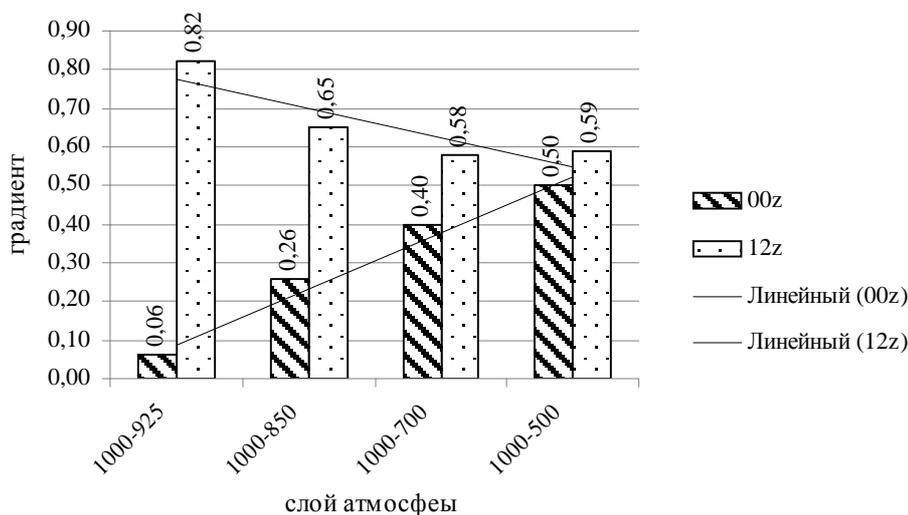


Рис. 2. Суточные изменения градиента температуры на различных высотах

температурного градиента наблюдается в марте ( $g = 0,43 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ м}$ ) и в ноябре ( $g = 0,40 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ м}$ ), что объясняется сезонной перестройкой синоптических процессов в атмосфере.

В дневное время среднемесячное значение вертикального температурного градиента от месяца к месяцу значительно увеличивается, особенно в теплый период (с мая по сентябрь) от  $g = 0,24 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ м}$  в декабре до  $g = 1,17 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ м}$  в июне. В этот период над Воронежем наблюдается неустойчивое состояние атмосферы, обусловленное радиационным фактором. Характер изменения вертикального температурного градиента на различных слоях атмосферы в дневное и ночное время суток представлен на рис. 2.

Из анализа рис. 2 следует, что характер изменения величины градиента температуры с высотой имеет явно выраженный суточный ход и свои особенности. В ночное время наименьшие значения градиента температуры наблюдаются у поверхности земли до высоты 700 м ( $g = 0,06 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ м}$ ). С увеличением высоты слоя атмосферы значение величины градиента увеличивается, достигая максимума в средней тропосфере. Такие изменения вертикального температурного градиента обусловлены радиационным выхолаживанием подстилающей поверхности и прилегающего к ней воздуха. В дневное время, с притоком солнечного тепла к поверхности земли и ее нагрева, происходит увеличение вертикального градиента

Повторяемость инверсии и изотермии на различных слоях атмосферы днем и ночью

| Время | Слой атмосферы (гПа) |         |         |         |
|-------|----------------------|---------|---------|---------|
|       | 1000-925             | 925-850 | 850-700 | 700-500 |
| 00z   | 62,6                 | 28,8    | 32,4    | 12,5    |
| 12z   | 17,9                 | 32,6    | 33,7    | 16,1    |

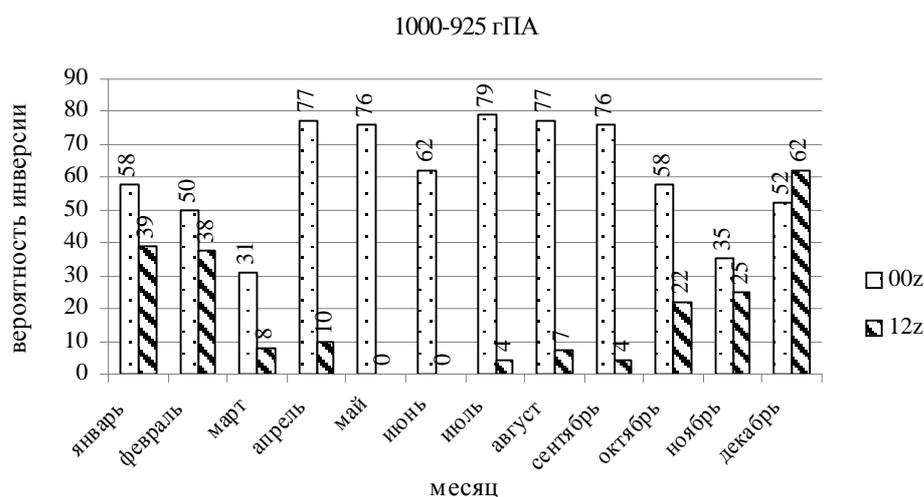


Рис. 3. Годовой ход вероятности появления инверсий

температуры в нижних слоях атмосферы и ослаблением его с высотой.

Проблеме влияния инверсии на концентрацию загрязняющих веществ посвящены работы А. В. Назаренко [23], Л. М. Акимова [2], в которых установлено, что при наличии инверсии в приземных слоях атмосферы концентрация загрязняющих веществ выше в 1,7-3,6 раза, чем при конвекции. Согласно таблице 2, теснота связи между индексом ИЗА и повторяемостью инверсий, составляет 0,38, что более чем в 2 раза превышает порог значимости для данного объема выборки. В таблице 3 представлена вероятность появления инверсионных слоев на различных высотах в ночное и дневное время суток.

Данные таблицы 3 свидетельствуют о том, что в ночное время с вероятностью 62,6 % наличие инверсионных слоев наблюдается в нижнем 700-метровом слое атмосферы, что вызвано большей плотностью здесь холодного воздуха. С увеличением высоты вероятность появления инверсий уменьшается до 12,5 % (высота 5,5 км). Относительно высокий процент появления инверсий, как в дневное, так и в ночное время (33,7 % и 32,4 % соответственно) на высотах 1,5-3,0 км (850-700 гПа) объясняется средней высотой атмосферных фрон-

тов. В дневное время у поверхности земли до высоты 700 метров вероятность появления инверсий составляет 17,9 % и наблюдается в основном в холодное время года, о чем свидетельствуют данные вероятности появления инверсий, представленные на рис. 3.

Рис. 3 наглядно показывает, что в дневное время суток с марта по сентябрь включительно вероятность появления инверсий в приземном слое атмосферы не превышает 7-10 %, а в мае и июне они не наблюдались вовсе. Максимальная вероятность появления инверсий в Воронеже в дневное время отмечается в декабре и составляет 62 %. Преобладающее (с вероятностью более 70 %) появление инверсий в нижнем 700-метровом слое атмосферы ночью наблюдается в теплый период с апреля по сентябрь. Это объясняется преобладанием антициклонального типа погоды.

Для изучения особенностей сезонной динамики загрязнения воздушного бассейна с учетом влияния функционально-планировочной структуры города и пространственной структуры атмосферы на формирование полей аэрогенного загрязнения были рассчитаны средние за месяц значения ИЗА в каждом пункте наблюдения, представленные в таблице 4.

Среднемесячные значения ИЗА Воронежа

| Месяц           | ИЗА    |             |        |            |         |
|-----------------|--------|-------------|--------|------------|---------|
|                 | пост 1 | пост 7      | пост 8 | пост 9     | пост 10 |
| январь          | 8,9    | 15,4        | 7,7    | <b>5,1</b> | 7,6     |
| февраль         | 10,3   | 16,1        | 7,8    | 5,6        | 8,3     |
| март            | 9,0    | 14,9        | 6,6    | 5,0        | 7,0     |
| апрель          | 13,1   | 16,4        | 9,0    | 6,3        | 9,0     |
| май             | 12,3   | 17,9        | 9,4    | 6,5        | 9,2     |
| июнь            | 11,3   | 19,5        | 9,3    | 6,2        | 9,4     |
| <b>июль</b>     | 13,6   | <b>22,9</b> | 10,4   | 6,3        | 11,1    |
| август          | 10,8   | 19,2        | 9,2    | 5,6        | 9,7     |
| <b>сентябрь</b> | 13,0   | <b>22,2</b> | 10,5   | 6,4        | 11,9    |
| октябрь         | 8,7    | 15,6        | 7,7    | 4,9        | 7,8     |
| ноябрь          | 8,4    | 13,1        | 7,1    | <b>4,8</b> | 7,1     |
| декабрь         | 10,3   | 17,3        | 8,3    | 5,8        | 8,9     |
| Среднее годовое | 10,8   | 17,6        | 8,6    | 5,7        | 8,9     |



Рис. 4. Пространственное распределение среднегодовых значений индекса ИЗА на территории Воронежа

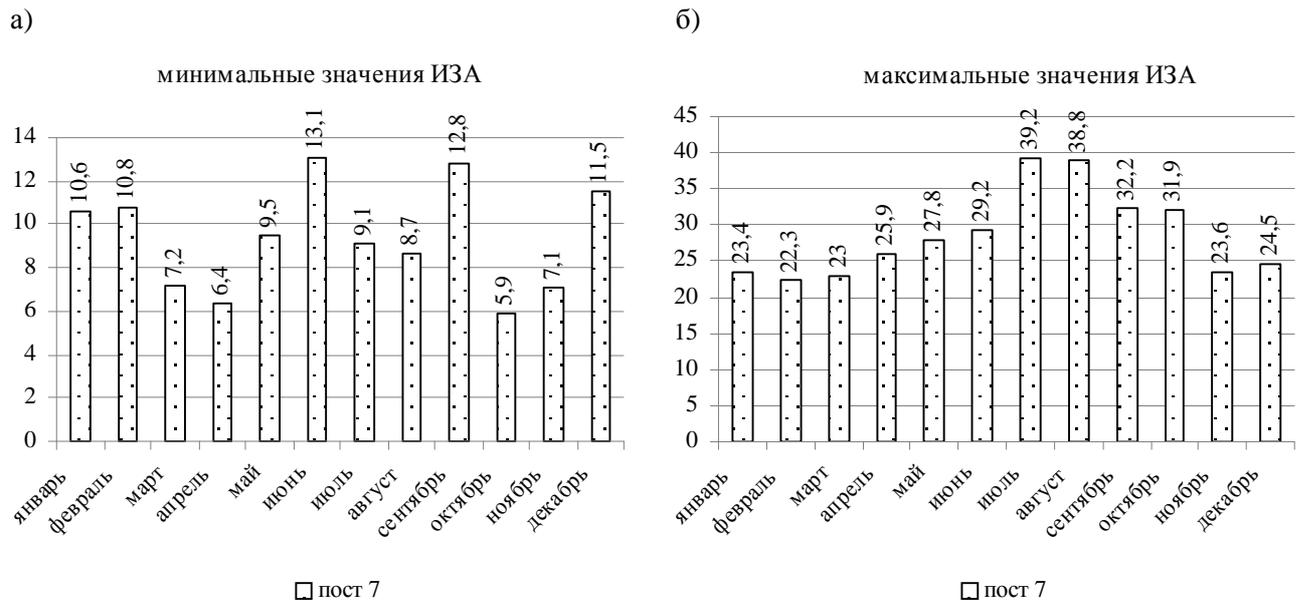


Рис. 5. Годовой ход ИЗА

Анализ таблицы 4 осуществлялся на основании критериев риска, представленных в таблице 1, согласно которым значение ИЗА от 14 и выше соответствуют критерию риска «опасный», от 7 до 13 – «вызывающий опасение», а 5-6 – «вызывающий беспокойство». Согласно таблице 4 на посту 1 (ул. Ростовская, 44) в течение года степень загрязнения атмосферы на основании анализа индекса ИЗА «вызывало беспокойство». На посту 7 (ул. Лебедева, 2) значения индекса ИЗА во все календарные месяцы года превышали уровень опасности в 1,2-1,5 раза. На посту 8 (ул. Ворошилова, 30) состояние воздушного бассейна находилось на уровне «вызывающий опасение». Наиболее благоприятные условия качества воздуха наблюдались на посту 9 (ул. Л. Рябцевой, 51-Б), где значения индекса ИЗА в октябре-ноябре были в пределах «допустимый», в остальное время находились на уровне «вызывающий беспокойство». Значение ИЗА на посту 10 (ул. 9 Января, 49) в течение года находятся в пределах «вызывающий опасение».

На рис. 4 представлено пространственное распределение среднегодовых значений индекса ИЗА на территории Воронежа.

Из рис. 4 видно, что состояние загрязнения воздушного бассейна в левобережной части Воронежа, особенно в районе поста 7, вызывает опасение, а значение индекса ИЗА в среднем в 1,3 раза превышает уровень «опасный». Значение индекса в центральной части правобережья Воронежа значительно меньше, чем на левом берегу, но в то же время «вызывают опасение» ( $7 < \text{ИЗА} < 13$ ).

Наиболее благоприятное состояние воздушного бассейна наблюдается в северной части города, где значение среднегодового индекса ИЗА = 5,7 «вызывает беспокойство», но при этом незначительно превышает «допустимый» уровень (ИЗА = 4,0).

Особый интерес представляют случаи экстремальных значений ИЗА, наблюдающиеся в различные месяцы года. На рис. 5 представлен годовой ход минимальных и максимальных значений ИЗА в календарных месяцах года на примере поста наблюдения 7.

Анализ рис. 5 позволяет сделать вывод о том, что в годовом ходе минимальных значений ИЗА (рис. 5а) не наблюдается какой-либо значимой закономерности. Наименьшие значения ИЗА наблюдаются в переходные сезоны года весной (март-апрель) и осенью (октябрь-ноябрь). Следует отметить, что в эти периоды времени значения ИЗА хотя и наименьшие за весь рассматриваемый период, но они превышают «предельно допустимый» уровень ИЗА (4,0). В этот период значения ИЗА «вызывают беспокойство» (ИЗА – 5,9 в октябре; 13,1 – в июне).

В максимальных значениях ИЗА (рис. 5б) наблюдается четко выраженный годовой ход с минимумами в холодное время (в особенности в феврале (ИЗА = 22,3)) и монотонным ростом значений индекса ИЗА до 39,2 в июле. Учитывая, что «опасный» уровень ИЗА составляет 14, становится очевидным более чем 2-х кратное превышение уровня опасности концентрации загрязнений в летний период.

Минимальные месячные значения ИЗА

| Месяц    | пост 1     | пост 7     | пост 8     | пост 9     | пост 10    | Градиент,<br>(°С/100 м) |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------------|
|          | ИЗА        | ИЗА        | ИЗА        | ИЗА        | ИЗА        |                         |
| январь   | 5,3        | 10,6       | 3,4        | 3,7        | 3,8        | 0,92                    |
| февраль  | 6,3        | 10,8       | 4,9        | 4,2        | 6,2        | 1,09                    |
| март     | 4,6        | 7,2        | 3,7        | 3,0        | 3,1        | 1,30                    |
| апрель   | 6,5        | 6,4        | 4,4        | 3,7        | 4,0        | 1,30                    |
| май      | 4,3        | 9,5        | 3,7        | 3,8        | 4,1        | 1,41                    |
| июнь     | 4,2        | 13,1       | 3,1        | 2,8        | 3,0        | 1,35                    |
| июль     | 4,6        | 9,1        | 3,1        | 3,4        | 3,5        | 1,25                    |
| август   | 4,3        | 8,7        | 3,9        | 3,4        | 4,0        | 1,52                    |
| сентябрь | 6,1        | 12,8       | 5,0        | 4,2        | 5,6        | 1,40                    |
| октябрь  | <b>2,8</b> | <b>5,9</b> | <b>2,5</b> | <b>2,6</b> | <b>2,7</b> | 1,17                    |
| ноябрь   | 5,1        | 7,1        | 3,8        | 3,1        | 4,0        | 1,13                    |
| декабрь  | 4,7        | 11,5       | 4,0        | 3,3        | 4,2        | 1,07                    |



Рис. 6. Среднегодовые минимальные значения ИЗА в пунктах наблюдения

Для выявления связи ИЗА с вертикальным температурным градиентом в таблице 5 представлены минимальные за каждый календарный месяц года значения ИЗА на каждом пункте наблюдения и соответствующие им значения градиента.

Из анализа таблицы 5 следует, что во всех случаях наименьшие значения индекса ИЗА наблюдались при «неустойчивом» состоянии атмосферы, т.е. значения вертикального градиента температуры в приземном 700-метровом слое атмосферы превышали уровень сухоадиабатического градиента ( $g = 1,0 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ м}$ ). Данное положение свидетельствует о сильной конвекции, т.е. мощных восходящих движениях воздуха, способствующих рассеянию загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы.

Для выявления влияния функционально-планировочной структуры города на формирование полей аэрогенного загрязнения на рис. 6 представлено распределение среднегодового минимального значения ИЗА.

Как видно из рис. 6, в правобережной части города минимальные значения ИЗА не превышают «допустимый» уровень индекса ИЗА = 4,0, в то время как в левобережной части, на посту 7, наблюдается значительно большее значение индекса (ИЗА = 9,4), что соответствует превышению уровня загрязнения атмосферы «вызывающий беспокойство» ( $5 < \text{ИЗА} < 6$ ). Такое распределение минимальных значений индекса ИЗА объясняется не только расположением промышленных объектов,

но и особенностями ландшафта. Правобережная возвышенная часть города больше прогревается за счет углов наклона склонов и их южной и юго-западной экспозициям, что способствует усилению конвективных потоков воздуха, по отношению, к равнинной территории левобережья.

Особый интерес представляет анализ максимальных значений ИЗА в зависимости от устойчивости атмосферы. Анализ устойчивости атмосферы проводился в данном случае на трех различных уровнях от поверхности земли до высот: 700, 1500 и 3000 м. Результаты максимальных месячных значений индекса ИЗА и вертикального температурного градиента в этот момент времени представлены в таблице 6.

Сопоставление данных по максимальным месячным значениям ИЗА и вертикального температурного градиента позволяет сделать следующие выводы:

1) В холодное время года максимальные значения индекса ИЗА наблюдаются при наличии мощных приземных инверсий, простирающихся до высоты 3,0 км. Величина отрицательных значений вертикального градиента температуры изменялась с высотой от  $g = -1,43 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ м}$  в слое атмосферы до 700 метров с уменьшением до  $g = -0,15 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ м}$  на 3,0 км.

2) В теплый период, максимальные значения индекса ИЗА (38,8 - июль, 39,2 - август на 7 посту наблюдения) возникали при устойчивой стратификации атмосферы и уменьшении фактической ве-

Таблица 6

Максимальные значения ИЗА

| Месяц    | Значения ИЗА |             |             |             |             | Градиент, ( $^\circ\text{C}/100 \text{ м}$ ) |              |              |
|----------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|--------------|--------------|
|          | пост 1       | пост 7      | пост 8      | пост 9      | пост 10     | 1000-925                                     | 1000-850     | 1000-700     |
| январь   | 12,5         | 23,4        | 10,3        | 7,8         | 11,5        | <b>-1,17</b>                                 | <b>-0,51</b> | <b>0,14</b>  |
| февраль  | 15,5         | 22,3        | 11,2        | 8,8         | 11,0        | <b>-1,43</b>                                 | <b>-0,74</b> | <b>-0,15</b> |
| март     | 16,3         | 23,0        | 10,4        | 9,8         | 14,5        | <b>-0,03</b>                                 | 0,39         | 0,61         |
| апрель   | 18,9         | 25,9        | 15,2        | 9,5         | 13,5        | <b>0,00</b>                                  | 0,41         | 0,50         |
| май      | 20,8         | 27,8        | 15,1        | 10,1        | 15,4        | 0,68   | 0,70         | 0,66         |
| июнь     | 19,1         | 29,2        | 14,7        | <b>13,1</b> | 17,6        | 0,82   | 0,83         | 0,65         |
| июль     | 20,0         | 38,8        | 17,0        | 9,6         | 19,3        | 0,72   | 0,61         | 0,67         |
| август   | <b>20,4</b>  | <b>39,2</b> | <b>19,2</b> | 9,5         | 25,2        | 0,71   | 0,49         | 0,48         |
| сентябрь | 18,7         | 32,2        | 16,4        | 9,0         | <b>34,0</b> | 0,39   | 0,58         | 0,72         |
| октябрь  | 17,2         | 31,9        | 14,5        | 7,2         | 14,8        | <b>-0,34</b>                                 | <b>-0,16</b> | 0,21         |
| ноябрь   | 11,8         | 23,6        | 10,8        | 6,2         | 11,4        | 0,03   | 0,20         | 0,23         |
| декабрь  | 14,3         | 24,5        | 11,4        | 9,8         | 12,4        | <b>-0,98</b>                                 | <b>-0,50</b> | <b>-0,04</b> |

личины вертикального градиента температуры с высотой от  $g = 0,71 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ м}$  до  $g = 0,48 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ м}$ .

При анализе влияния функционально-планировочной структуры города на формирование полей аэрогенного загрязнения особый интерес представляют данные поста наблюдения № 10. Здесь четко просматривается одна из насущных проблем города – транспортная загруженность, а именно: наличие в районе данного поста так называемого «бутылочного горлышка» (резкое сужение автомобильной дороги с 3-полосной в фактически 1-полосную с учетом автобусных остановок) и наличие не регулируемого пешеходного перехода, способствующего созданию многокилометровой пробки в часы пик.

Таким образом, вырисовывается ясная картина распределения поллютантов в пределах городской черты г. Воронежа. Максимальные показатели индекса загрязнения атмосферы отмечаются в пределах левобережного промышленно-производственного комплекса, что объясняется, как большей концентрацией расположенных в данном районе промышленных объектов, так и особенностями ландшафта (пониженная выровненная поверхность, с абсолютными отметками высот, не превышающими 130 метров и не способствующая усилению конвективных потоков воздуха). Также следует особо отметить территории, прилегающие к крупным транспортным автомагистралям, как в левобережной, так и в правобережной частях города.

Во всех частях Воронежа ситуация значительно усугубляется в теплое время года, когда наблюдаются максимальные значения индекса ИЗА вследствие устойчивой стратификации атмосферы (определяемой значениями вертикального градиента температуры), препятствующей восходящим движениям воздуха, которые способствуют рассеянию загрязняющих веществ. И напротив, минимальные значения индекса ИЗА наблюдались при «неустойчивом» состоянии атмосферы, т.е. значения вертикального градиента температуры в приземном слое превышали  $1,0^\circ\text{C}$  на 100 м, что приводит к мощному вертикальному движению воздуха.

Проведенный анализ позволил выявить значительную роль влияния состояния атмосферы на формирование полей загрязняющих веществ и показал возможность использования вертикального градиента температуры в качестве предиктора в математических моделях загрязнения воздуха над Воронежем. Также доказана важная роль учета функционально-планировочной структуры города при экологическом проектировании.

**Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 14-054-00722\_а.**

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов Л. М. Использование сетчатых материалов в экспресс-анализе экологической ситуации г. Воронежа в холодный период / Л. М. Акимов, Т. И. Прожорина, В. В. Сиваченко. – 2010. – № 2. – С. 127-131.
2. Акимов Л. М. Геоэкологическая оценка загрязнения воздушного бассейна города Воронежа автотранспортом в зависимости от состояния атмосферы / Л. М. Акимов, А. Б. Якушев, С. А. Куролап // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. – 2011. – № 2. – С. 158-165.
3. Буштуева К. С. Состояние проблемы санитарной охраны атмосферного воздуха и перспективы ее решения / К. С. Буштуева // Руководство по гигиене атмосферного воздуха. – Москва : Медицина, 1976. – С. 56-58.
4. Безуглая Э. Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов / Э. Ю. Безуглая. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1980. – 184 с.
5. Безуглая Э. Ю. Мониторинг состояния загрязнения атмосферы в городах: результаты экспериментальных исследований / Э. Ю. Безуглая. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1986. – 199 с.
6. Безуглая Э. Ю. Чем дышит промышленный город / Э. Ю. Безуглая, Г. П. Расторгуева, И. В. Смирнова. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1991. – 256 с.
7. Берлянд М. Е. К теории антропогенного воздействия на локальные метеорологические процессы в городе / М. Е. Берлянд, М. Н. Зашихин // Метеорология и гидрология. – 1982. – № 2. – С. 5-16.
8. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.
9. Воронеж : среда обитания и зоны экологического риска / С. А. Куролап [и др.]. – Воронеж : Истоки, 2010. – 207 с.
10. Городской микроклимат, загрязнение атмосферы и риск для здоровья населения города Воронежа / С. А. Куролап [и др.] // Актуальные проблемы географии и геоэкологии : электронное научное периодическое издание. – Москва, 2009. – Вып. 1 (5). – С. 1-13.
11. Епринцев С. А. Формирование зон экологического риска в промышленно-развитом городе (на примере г. Воронежа) : автореф. дис. ... канд. геогр. наук / С. А. Епринцев. – Воронеж, 2007. – 24 с.
12. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю. А. Израэль. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. – 380 с.
13. Исаев А. А. Экологическая климатология / А. А. Исаев. – Москва : Научный мир, 2003. – 470 с.
14. Костылева Л. Н. Экологическая оценка сезонной динамики загрязнения воздушного бассейна города Воронежа / Л. Н. Костылева, С. И. Корыстин, С. А. Куролап // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. – 2011. – № 2. – С. 158-165.

ного университета. Сер. География. Геоэкология. – 2009. – № 2. – С. 107-113.

15. Куролап С. А. Геоэкологические основы мониторинга и эколого-гигиеническое зонирование городской среды / С. А. Куролап, В. И. Федотов // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. – 2000. – № 4. – С. 120-123.

16. Куролап С. А. Медико-географическая оценка атмосферных факторов, влияющих на население промышленного мегаполиса (на примере г. Воронежа) / С. А. Куролап, Ю. Н. Барвигенко, В. М. Щербаков // Проблемы региональной экологии. – 2008. – № 3. – С. 183-189.

17. Куролап С. А. Оценка риска для здоровья населения при техногенном загрязнении городской среды / С. А. Куролап, Н. П. Мамчик, О. В. Клепиков. – Воронеж : Воронежский государственный университет, 2006. – 220 с.

18. Оценка риска для здоровья населения, связанного с техногенным загрязнением города Воронежа / С. А. Куролап [и др.] // Теоретическая и прикладная экология. – 2008. – № 3. – С. 42-49.

19. Куролап С. А. Экологическая оценка качества воздушного бассейна г. Воронежа / С. А. Куролап, О. В. Клепиков, Л. Н. Костылева // Экологические системы и приборы. – 2010. – № 5. – С. 29-34.

20. Назаренко А. В. Классификация синоптических процессов в целях геоэкологического мониторинга воз-

душного бассейна / А. В. Назаренко // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. – 2006. – № 1. – С. 39-46.

21. Назаренко А. В. Инверсии в атмосфере / А. В. Назаренко. – Воронеж : Воронежское высшее военное авиационное инженерное училище 1993. – 98 с.

22. Назаренко А. В. Эффективность инверсий температуры и их влияние на загрязнение атмосферы / А. В. Назаренко // Труды Главной геофизической обсерватории. – Санкт-Петербург, 1991. – Вып. 543. – С. 86-95.

23. Назаренко А. В. Исследование уровня загрязнения воздуха г. Воронежа при использовании аэросиноптического материала / А. В. Назаренко, С. А. Дьяков // Высокие технологии в экологии : сборник материалов VI Международной научно-практической конференции. – Воронеж, 2003. – С. 41-45.

24. Чубирко М. И. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия в городском округе город Воронеж в 2013 году : доклад / М. И. Чубирко, Ю. И. Степкин. – Воронеж : Управление Роспотребнадзора по Воронежской области, 2014. – 107 с.

25. Turiel I. Indoor air pollution / I. Turiel. – Stanford : Stanford University Press, CA, 1985. – 124 p.

26. Wilson R. Simple Area Source Algorithm for Risk Assessment Screening / R. Wilson // Memorandum to P. Cirrone, 1990. – P. 135-137.

Акимов Леонид Мусамудинович

кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой природопользования факультета географии, геоэкологии и туризма Воронежского государственного университета, г. Воронеж, т. (473) 266-56-54, 8-951-850-49-82, E-mail: [akl63@bk.ru](mailto:akl63@bk.ru), [root@geogr.vsu.ru](mailto:root@geogr.vsu.ru)

Виноградов Павел Михайлович

аспирант кафедры геоэкологии и мониторинга окружающей среды факультета географии, геоэкологии и туризма Воронежского государственного университета, г. Воронеж, т. (473)266-56-54, E-mail: [vinpaul89@gmail.com](mailto:vinpaul89@gmail.com)

Акимов Евгений Леонидович

магистрант кафедры природопользования факультета географии, геоэкологии и туризма, Воронежского государственного университета, г. Воронеж, т. 8-951-562-34-61, E-mail: [akimovvsu@gmail.com](mailto:akimovvsu@gmail.com)

Akimov Leonid Musamudinovitch

Candidate of Geographical Sciences, associate professor, Head of the chair of nature management, Department of geography, geoecology and tourism, Voronezh State University, Voronezh, tel. 8-951-850-49-82, (473) 266-56-54, E-mail: [akl63@bk.ru](mailto:akl63@bk.ru), [root@geogr.vsu.ru](mailto:root@geogr.vsu.ru)

Vinogradov Pavel Mikhailovitch

Post-graduate student of the chair of geoecology and environment monitoring, department of geography, geoecology and tourism, Voronezh State University, Voronezh, tel. (473) 266-56-54, E-mail: [vinpaul89@gmail.com](mailto:vinpaul89@gmail.com)

Akimov Yevgeniy Leonidovitch

Master of the chair of nature management, department of geography, geoecology and tourism, Voronezh, State University, Voronezh, tel. 8-951-562-34-61, E-mail: [akimovvsu@gmail.com](mailto:akimovvsu@gmail.com)