

DOI: 10.15593/2409-5125/2021.01.05

УДК 504.064.37:528.8

**Т.И. Низамутдинов<sup>1</sup>, Е.В. Колесникова<sup>2</sup>, Д.К. Алексеев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет

<sup>2</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет

## **ВЛИЯНИЕ ЗЕЛЕННЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА ДИНАМИКУ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В ГОРОДАХ**

Представлены результаты анализа пространственно-временного распределения загрязнения воздуха для двух промышленных городов – Уфы и Архангельска. На основе спутниковых снимков дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для двух городов построены карты пространственных моделей распределения индекса вегетационной активности NDVI по основным функциональным зонам города: «жилая застройка», «промышленные районы», «рекреационные зоны» и «автомагистрали» в районах с интенсивным движением транспорта. Показано, что в Уфе имеется богатый «зеленый фонд», представленный пойменными лесами, лесопарками, парками и скверами. Однако в центральной части города отсутствуют зеленые насаждения с высокой плотностью фитомассы. Зеленые насаждения в Архангельске имеют гораздо меньшую удельную площадь и плотность, лето здесь более холодное, вегетационный период короткий.

Впервые для Уфы по многолетним ежедневным наблюдениям УГМС построены карты распределения концентраций канцерогенного загрязняющего вещества бенз(а)пирен (БаП) для каждого месяца активной вегетации, выделены опасные зоны для здоровья горожан. Изолинии концентраций БаП совмещены с картами распределения индекса NDVI. Дан анализ роли зеленого каркаса города в формировании пространственно-временного распределения загрязнения воздуха. Показано, что самые загрязненные, индустриальные районы города до начала вегетации характеризуются максимальными по городу концентрациями БаП. Но с развитием растительности в индустриальных зонах концентрации БаП снижаются и в июле–августе становятся ниже, чем в жилой части города, где зеленые насаждения практически отсутствуют. Данные исследования подтверждены для вегетационного периода Архангельска.

Проведен статистический анализ данных, который показал, что для всей территории Уфы прослеживается четкая временная зависимость величин концентрации БаП от времени года. В период вегетации во всех районах города вместе с ростом NDVI происходит резкое снижение значений концентраций БаП.

**Ключевые слова:** зеленые насаждения, бенз(а)пирен, дистанционный мониторинг, спутниковые снимки, город Уфа, город Архангельск, дистанционное зондирование Земли, вегетационный индекс NDVI, урбанизированные территории, промышленные города.

**Постановка проблемы.** Одной из основных причин смертности и заболеваемости во всем мире, по оценкам Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), является загрязнение атмосферного воздуха. Аэрогенной экспозиции химических веществ подвергается 9 человек из 10, что ежегодно приводит к 7 миллионам случаев смерти. Особое внимание ВОЗ уделяет канцерогенным веществам. Вызывая онкологические заболева-

ния, они особенно опасны даже в небольших дозах, создают риск проявления заболевания на протяжении всей жизни. Вопреки концепции предельно допустимых концентраций, ВОЗ доказала, что канцерогенные вещества не имеют безопасной для организма дозы, а значит, и концентрации. В то же время процессы формирования поля канцерогенного риска здоровью в городах изучены недостаточно. Проблемы исследований в данной области связаны с необходимостью анализа и обобщения больших разнородных массивов данных о загрязнении атмосферного воздуха по всей территории города за многолетний период, а также исследований внутригодовой динамики концентраций загрязняющих веществ.

При выявлении особо опасных зон и разработке планировочных решений для городов особое внимание сейчас уделяют зеленым насаждениям, их влиянию на пространственно-временное распределение поля риска здоровью населения. Известно, что оптимизация зеленого каркаса в значительной мере определяет комфортность проживания горожан, эстетическую привлекательность городской среды. Однако количественные оценки роли озеленения города в очищении атмосферного воздуха на натурном материале проводятся нечасто из-за отсутствия данных о внутригодовой динамике концентраций загрязняющих веществ.

Цели данной работы связаны с выявлением влияния зеленых насаждений на формирование поля техногенного загрязнения приземного слоя атмосферы промышленных городов. Для этого решались следующие задачи:

- на примере двух крупных городов, различных по своему географическому положению и характеру промышленности, провести картографический анализ внутригодовых закономерностей динамики количества и качества зеленых насаждений;

- провести анализ внутригодовой динамики загрязнения приземного слоя атмосферы города;

- выявить общие тенденции между внутригодовой динамикой роста фитомассы в городе и формированием полей загрязнения воздуха.

**Материалы и методы.** В работе проведены исследования для двух городов – Уфы и Архангельска. Различные по географическому положению, характеру промышленности и типу зеленых насаждений, оба города являются важными транспортными и промышленными узлами России и периодически входят в десять самых загрязненных городов страны. Город Уфа – крупный центр многоотраслевой промышленности, с населением более миллиона человек. Климат Уфы атлантико-континентальный, достаточно влажный, лето теплое, зима умеренно суровая. Преобладают ветры южного направления (32 %), а также юго-западного (17 %) и северо-

западного (12 %). Промышленность города специализируется на переработке нефтепродуктов, производстве химических и нефтехимических материалов, машиностроении. Однако функционирование промышленных предприятий и автотранспорта города связано с большим количеством выбросов загрязняющих веществ. По данным ФГБУ «Башкирское УГМС», уровень загрязнения воздуха характеризуется как повышенный и определяется высокими концентрациями таких веществ, как BaП, диоксид азота, формальдегид и взвешенные вещества [1].

Архангельск – крупный промышленный город севера европейской части России с населением почти 350 тыс. человек. Климат в Архангельске умеренный морской, количество солнечного тепла и света незначительно. Характерно короткое и довольно холодное лето и длинная умеренно-морозная зима. Преобладают ветра южного (18 %), а также юго-западного (15 %) и западного (15 %) направления. В городе функционируют предприятия целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности, объекты теплоэнергетики, машиностроительные и судоремонтные заводы. Это в сумме с постоянно растущим количеством автотранспорта оказывает негативное влияние на качество атмосферного воздуха, которое характеризуется повышенным уровнем загрязнения и определяется превышением среднегодовых ПДК формальдегида и BaП [2].

Как было отмечено выше, BaП является одним из приоритетных загрязняющих веществ воздуха двух городов. Он относится к веществам 1-го класса опасности. Среднесуточная предельно допустимая концентрация BaП в воздухе населенных мест составляет  $0,001 \text{ мкг/м}^3$ . Кроме того, BaП – канцерогенное вещество, мониторингу которого ВОЗ уделяет особое внимание. Вызывая онкологические заболевания, такие вещества не имеют безопасного уровня воздействия – порога. Связи «доза поллютанта – ответ организма» для канцерогенных веществ описываются моделями беспороговой концепции, т.е. риск здоровью возникает при любой малой дозе вещества, попавшей в организм. Мутация даже в одной клетке может вызвать заболевание, которое угрожает проявиться на протяжении всей жизни экспонируемого индивидуума. Доказано, что BaП в составе выбросов промышленных предприятий аккумулируется на частицах пыли в воздухе, не переносится на большие расстояния и осаждается на почву или снег, формируя относительно устойчивые во времени и пространстве поля загрязнения [3, 4].

Исследования для Уфы, проведенные на базе наблюдений ФГБУ «Башкирское УГМС», позволили оценить колебания BaП в атмосферном воздухе по шести стационарным постам. Станции мониторинга охваты-

вают всю площадь города и условно могут быть поделены на «городские фоновые» в жилом районе (станция 17), «промышленные» вблизи предприятий (станции 14 и 18) и «авто» вблизи автомагистралей, в районах с интенсивным движением транспорта (станции 2, 5, 23). Деление является условным, так как застройка города и размещение предприятий не позволяют сделать четкого разделения районов. Мониторинг загрязнения атмосферы осуществлялся только в жилой зоне городов, а не на промплощадках предприятий. Измерения проводились ежедневно в 7, 13 и 19 ч. В работе проанализированы среднемесячные значения концентраций БАП за период с 2012 по 2016 год.

Для Архангельска исходные данные получены на основе результатов работ по составлению сводного тома «Охрана атмосферы и предельно допустимые выбросы города Архангельска». В рамках сводного тома ПДВ по г. Архангельску учтены выбросы 94 промышленных предприятий и автотранспортных потоков на 15 основных автомагистралях города. По полученным данным были сформированы базы и введены в УПРЗА ПК «Призма-регион». В результате построены первичные изолинии полей максимальных приземных концентраций БАП.

Зеленые насаждения Уфы представлены парками, скверами, озелененными территориями вдоль автомобильных дорог и площадей. Здесь преобладают мягколиственные породы деревьев: липа, ольха черная, береза и тополя. Твердолиственные насаждения представлены дубом низкоствольным, ильмовыми, ясенем и кленом. Хвойные насаждения составляют лишь 4,2 %, в том числе: сосна, ель, лиственница и кедр. Распределение относительной фитомассы в пределах городской территории чрезвычайно неоднородно. Наибольшее распространение зеленые насаждения получили в Октябрьском, Кировском районах, а также на севере, в промышленной части города. Площадь зеленых насаждений здесь составляет примерно 25 % от площади района. Крайне низкими показателями озеленения отличается центр города и Советский район [5]. В Архангельске, в отличие от Уфы, преобладают хвойные деревья, а именно сосна. Из лиственных пород преобладает береза, ива, ольха серая и осина [6]. В центре города зеленые насаждения имеют крайне низкую плотность, представлены небольшими парками и скверами. Кроме того, в Архангельске зеленые зоны характеризуются низким показателем фитомассы, что снижает их газопоглотительный и газопродуктивный потенциал. На востоке от плотной жилой застройки произрастают обширные лесные массивы, много болот.

Два города имеют разный удельный «зеленый» фонд на каждого жителя. Так, в Уфе на каждого горожанина приходится 25–30 м<sup>2</sup> растительности. В Архангельске на каждого жителя приходится лишь 2,4 м<sup>2</sup>. Для сравнения: в Москве этот показатель составляет 16 м<sup>2</sup>, в Санкт-Петербурге – 13,8 м<sup>2</sup>, в Краснодаре 33,7 м<sup>2</sup>. По нормативным документам РФ, норма зеленых территорий общего пользования на одного человека должна составлять 10–15 м<sup>2</sup>. Как можно видеть, Архангельск находится в крайне невыгодном положении [7, 8].

Для выявления особенности формирования полей устойчивого загрязнения воздуха предпринята попытка оценить площадь и качество растительного покрова на исследуемых территориях. Одним из наиболее эффективных методов для оценки параметров растительности с применением дистанционного зонирования Земли (ДЗЗ) является расчет и анализ спектральных вегетационных индексов [9, 10]. В основе спутникового картографирования растительного покрова лежит метод измерений характеристик отраженного излучения в различных диапазонах длин волн [11–13]. Наиболее популярным вегетационным индексом для дистанционного мониторинга растительности является индекс NDVI – нормализованный относительный индекс растительности (Normalized Difference Vegetation Index), выведенный Такером в 1979 году [14]. Величина индекса NDVI может колебаться от –1,0 (полное отсутствие растительности) до +1,0 (растительность высокой плотности с высоким содержанием в зеленой массе хлорофилла, азота, влаги). Для расчета индекса NDVI используются коэффициенты спектральной яркости, которые измеряются в результате спутниковых наблюдений земной поверхности. Эти коэффициенты в видимой, красной и ближней инфракрасной области спектра, и отраженное излучение на этих длинах волн позволяет характеризовать общее состояние растительности [13]:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho(\text{NIR}) - \rho(\text{Red})}{\rho(\text{NIR}) + \rho(\text{Red})}, \quad (1)$$

где  $\rho(\text{NIR})$  – отражение в ближней инфракрасной области спектра;  $\rho(\text{Red})$  – отражение в красной области спектра.

Для анализа характера и плотности растительности в работе использовались данные ДЗЗ, а именно – спутниковые снимки в красном и ближнем инфракрасном диапазоне. Применялись ДЗЗ миссий Sentinel 2 и Landsat7/8. Для Уфы было найдено и обработано 45 спутниковых снимков миссии Sentinel 2, относящихся к периоду с 2012 по 2016 год. Отбирались снимки, сделанные в течение вегетационного периода (с марта по ноябрь).

Для Архангельска найдены и обработаны 3 спутниковых снимка миссии Landsat 8 за 2010 год, сделанные в летний период (июнь, июль, август).

Для оценки влияния растительности на пространственно-временное распределение полей загрязнения воздуха на карты распределения индекса NDVI были нанесены изолинии значений среднегодовых концентраций бенз(а)пирена. Интерполяция данных величин проводилась с помощью метода минимальной кривизны (Multilevel B-Spline Interpolation) [15]. Построение моделей пространственной интерполяции и передискретизация полученных растровых изображений выполнялись при помощи ГИС систем SAGA GIS v7.2.0.

**Результаты и обсуждение.** Построенные карты распределения индекса NDVI в Уфе (рис. 1) показывают, что в начале вегетационного периода (апрель) значения NDVI в среднем по городу составляют 0,23, что соответствует низкой степени развития растительности. С началом активной фазы вегетации (май) значения NDVI начинают увеличиваться на всей территории города. Максимальные значения NDVI наблюдаются в районе станций № 2 и № 14 (промышленный район города) и составляют в среднем 0,6, что характерно для высокой степени развития растительности. Минимальные значения – в районе станций №№ 17, 18 и 23 (район плотной жилой застройки), составляют в среднем 0,45, что характерно для средней степени развития растительного покрова.

В июне уже хорошо заметны основные зеленые зоны города: лесопарковая зона вдоль р. Белой, лесопарк Курочкиной горы, пойменный лес р. Уфы, полуостров Лихачевский, Кузнецовский затон, урочище Терегулоские Луга, а также парки и скверы города. В августе в Уфе самые высокие значения NDVI за весь вегетационный период. Максимальные значения вновь наблюдаются в промышленном районе, в среднем 0,67, что характерно для высокой степени развития растительности. Минимальные значения NDVI традиционно наблюдаются в районе жилой застройки – 0,47, что отражает среднюю степень развития растительности.

К концу активной фазы вегетации (сентябрь) значения NDVI на всей территории города снижаются. Среднее значение по городу составляет 0,25, что отражает очень низкую степень развития растительности. Поскольку с ноября по март зеленая масса растительности отсутствует, значения NDVI для всей территории города менее 0, что соответствует снежному покрову и искусственным поверхностям.

Для Архангельска расчеты и картирование значений индекса NDVI за июль 2010 года представлены на рис. 2. Хорошо видно, что для всей территории города характерна низкая степень развития растительности,

среднее значение NDVI составляет 0,34. Для центра города характерна крайне низкая степень озеленения. Парк им. М. Ломоносова и прилегающее к нему Вологодское кладбище имеют общие размеры примерно 600×300 м, парк Зарусье – 200×85 м.

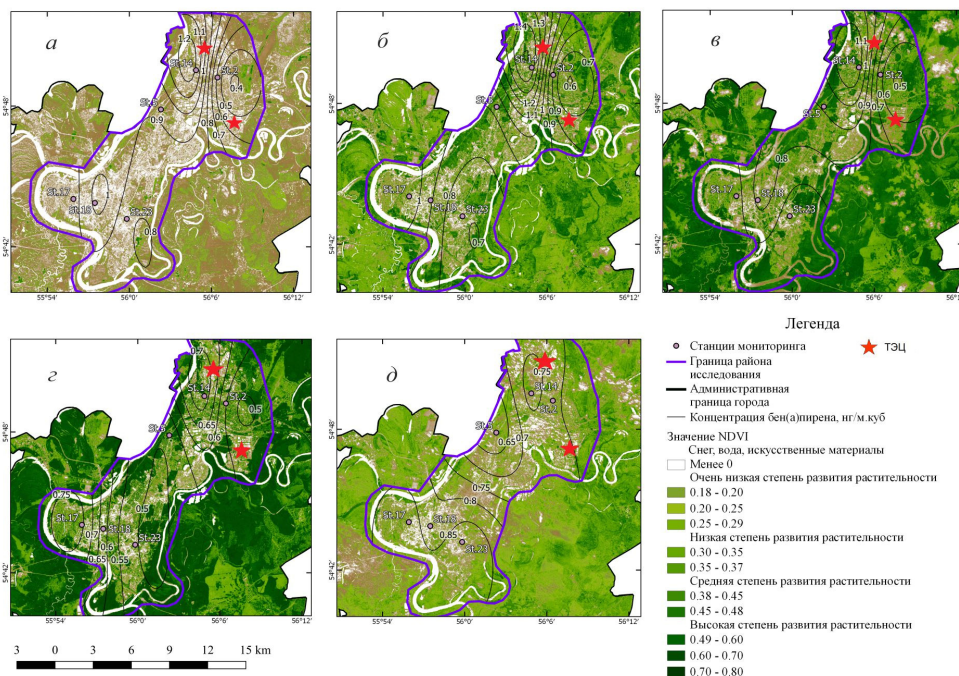


Рис. 1. Значения NDVI на территории г. Уфы и концентрации бенз(а)пирена за период с 2012 по 2016 год: а – апрель; б – май; в – июнь; г – август; д – сентябрь

Для Уфы проведена детальная оценка внутригодовой динамики концентраций БАП по территории города, т.е. по шести станциям (см. рис. 1). В среднем за 5 лет минимальное значение концентраций наблюдалось в июле, в районе станции № 2 (промышленный район города) – 0,3 нг/м<sup>3</sup>. Это территория с высокими показателями фитомассы, рядом лесные массивы и дачные поселки. Максимальное значение зарегистрировано также на станции № 2, но в январе – 4,6 нг/м<sup>3</sup>, что более чем в четыре раза превышает ПДК. Другими словами, без растительности здесь формируется поле высоких концентраций БАП исключительно за счет работы предприятий и, возможно, отопительных печей населения. На рис. 3 видна четкая временная зависимость величин концентрации БАП от времени года для всех шести станций наблюдения. Как можно видеть, в период вегетации (с апреля по октябрь) во всех районах города происходит резкое снижение значений концентраций, достигая минимума в пик вегетации – июль–

август. В среднем за 5 лет концентрации БаП летом не превышают значе- ний ПДК. В зимний период концентрации примерно в 3 раза выше и, как правило, превышают ПДК.

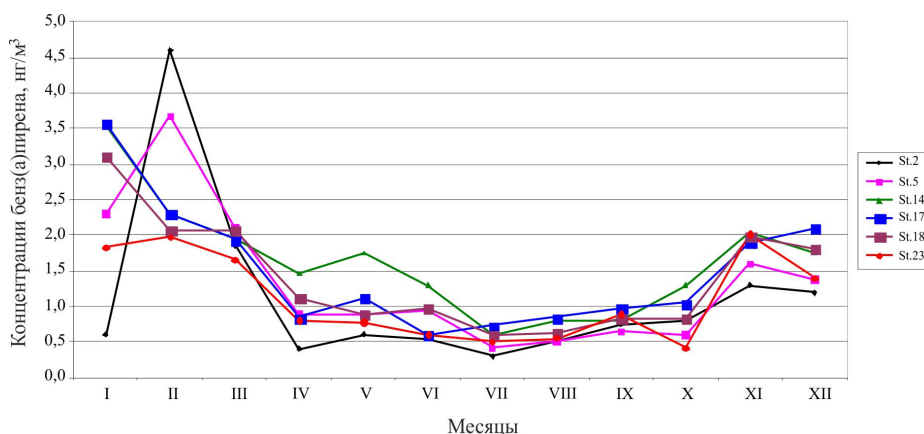
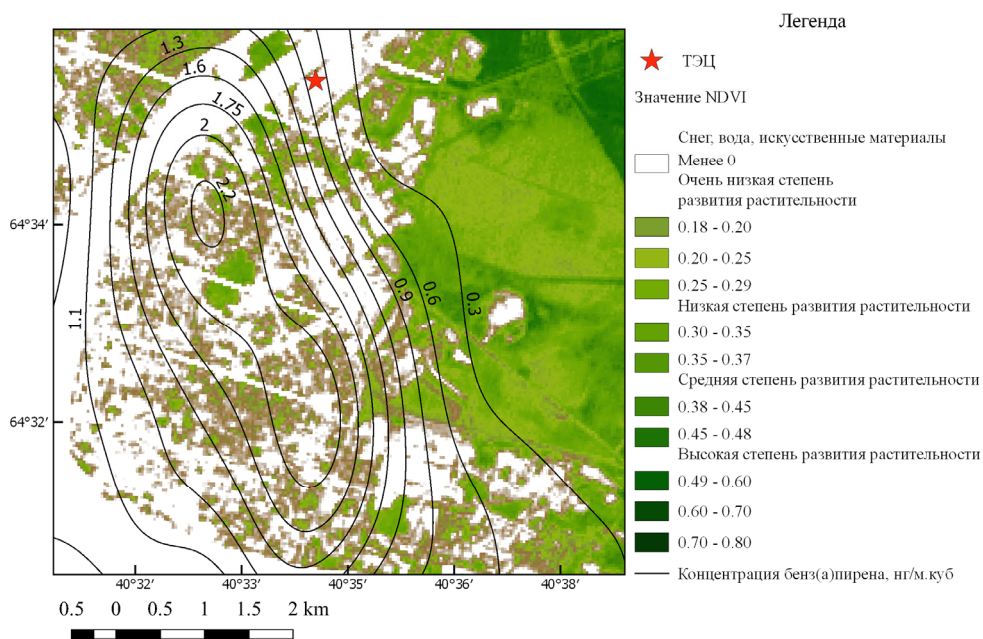


Рис. 3. Среднегодовые значения концентраций бенз(а)пирена в Уфе с 2012 по 2016 год

Для анализа пространственно-временной динамики формирования полей загрязнения воздуха на карты индекса NDVI были нанесены изолинии средних за пять лет значений концентраций БаП отдельно для каждо-



го месяца (см. рис. 1). Как можно видеть, в Уфе на протяжении всего года имеется устойчивый очаг загрязнения БАП, станции 2 и 14. Это индустриальная зона на северо-западе города, здесь находятся предприятия крупного промышленного комплекса «Башнефть», которые, по-видимому, и создают устойчивое поле аэрогенного риска здоровью. Недалеко от основного очага расположена и Уфимская ТЭЦ-1. Однако хорошо видно, что вторая ТЭЦ, Уфимская ТЭЦ-2, находящаяся в центральной части города, практически не влияет на распределение концентраций БАП в течение всего года. В апреле, до начала активной вегетации, поле риска в северо-западной индустриальной части города формируется исключительно выбросами промышленных предприятий. Видно, что значения концентраций быстро убывают по мере удаления от промышленной зоны и уже в 3 км к востоку снижаются на порядок (с 1,2 до 0,4 нг/м<sup>3</sup>).

В мае картина распределения опасных зон загрязнения меняется незначительно. Однако в промышленном районе города (станции 2, 12 и 14) значения индекса NDVI начинают увеличиваться (максимальный NDVI – 0,60). В районах с менее развитыми зелеными насаждениями (станции 17, 18 и 23) индекс NDVI на всем протяжении вегетационного периода практически не изменяется (0,25–0,50). В июне, когда растительность уже хорошо развита, происходит заметное снижение концентраций БАП в северной индустриальной части города: с 1,5 до 1,1 нг/м<sup>3</sup> на северо-западе и с 0,6 до 0,5 нг/м<sup>3</sup> на северо-востоке города.

В августе растительность на всей территории Уфы находится на пике активности. В промышленном районе города среднее значение индекса NDVI достигает значения 0,67 (высокая степень развития растительности), а в районе города с плотной жилой застройкой среднее значение индекса NDVI составляет лишь 0,47 (средняя степень развития растительности). При этой ситуации осредненные значения БАП в промышленном районе города достигают 0,70 нг/м<sup>3</sup>, минимальные значения для промышленной зоны за год. Интересно, что в жилом районе города на юго-западе (Нижегородка) наблюдаются более высокие значения – 0,75 нг/м<sup>3</sup>. В этом районе зеленый каркас полностью отсутствует, озеленение представлено лишь газонами. Таким образом, в период активной вегетации происходит перераспределение зон с высокими концентрациями БАП из индустриальной, но зеленой части города, в жилую, с крайне бедным озеленением.

Внутри жилых районов также происходит смещение максимумов загрязнения. В апреле поле максимального загрязнения в жилой застройке относится к ее центральной части, где высокий уровень транспортного трафика. А в августе поле максимумов смещается на запад, так как в цен-

тральной части города появляются зеленые зоны, а на западе, в Нижнегороке, они отсутствуют в течение всего года.

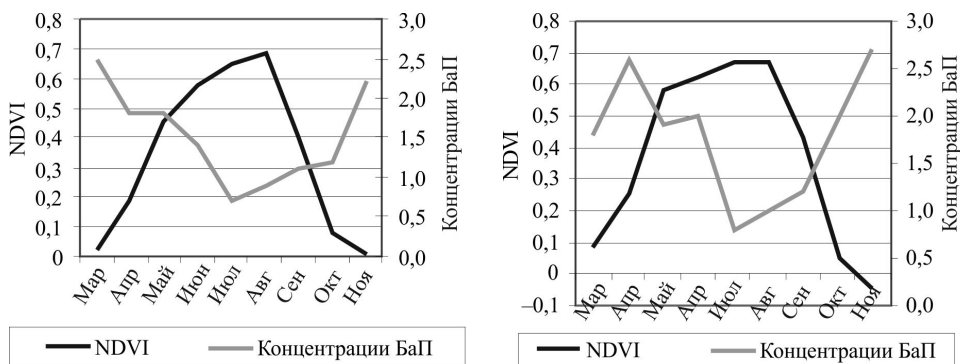
В сентябре плотность зеленых насаждений уменьшается, снижается содержание в них хлорофилла, азота и влаги, что хорошо видно по снижению индекса NDVI. В это же время концентрации БАП по всему городу начинают расти.

Важно отметить, что на северо-востоке Уфы, всего в 3,5 км от основного очага загрязнения города, находится устойчивое во времени поле с низкими концентрациями БАП. Это граница промышленной зоны Уфы, в непосредственной близости располагается лесопарк Курочкиной горы, лесозащитные полосы, дачи. Южнее, в 1,3 км, находится парк культуры и отдыха «Первомайский». В 1,8 км – парк им. Николая Гастелло и обширный зеленый массив – пойменный лес р. Уфы. Севернее, в 2 км, находится Лопатинское кладбище, также имеющее зеленые насаждения. Несмотря на невыгодное относительно розы ветров расположение, северо-восточная часть города с жилой застройкой остается относительно чистой во время вегетационного периода, что, по-видимому, объясняется большим количеством зеленых зон.

Для Архангельска распределение значений NDVI в июле представлено на рис. 2. Как можно видеть, для всей территории города характерна низкая степень развития растительности при среднем значении NDVI для города, равном 0,34. Это объясняется суровым климатом и более северным типом растительности: преобладают хвойные, почти отсутствуют кустарники. Для Архангельска значения концентраций БАП ожидаемо оказались выше, но так же, как и для Уфы, хорошо видна картина формирования поля риска. В центре города, где жилая застройка более плотная и высокий уровень автомобильного трафика, наблюдаются максимальные для города значения концентрации БАП 2,2 нг/м<sup>3</sup>. Поле высокого загрязнения имеет вытянутую форму с двумя максимумами. Обе области максимальных значений концентраций БАП не имеют точного территориального совпадения с промышленными предприятиями и формируются, по-видимому, в основном выбросами автотранспорта. И северная, и южная области высокого загрязнения покрывают районы с медицинскими учреждениями и гаражи. Зеленые насаждения здесь есть, но они столь малочисленны и малы по площадям, что, как можно видеть, совершенно не участвуют в формировании поля загрязнения воздуха. Значения концентраций быстро снижаются (до 0,3 нг/м<sup>3</sup>) при удалении от центра города на восток Архангельска, где хорошо развита растительность. На северо-востоке города расположена Архангельская ТЭЦ, основным видом топли-

ва для которой является природный газ. Как видно из рис. 2, она не вносит значительного вклада в формирование поля загрязнения атмосферы БаП.

Статистический анализ исходных данных показал, что ряды концентраций БаП неслучайны и неоднородны. Коэффициент вариации рядов высок и достигает 80 %. Также было показано, что все временные ряды хорошо описываются нормальным законом распределения. Значения NDVI и концентраций БаП находятся в противофазе. Как видно на рис. 4, максимальные значения NDVI наблюдаются в августе. В это же время хорошо заметен минимум концентраций бенз(а)перена. Результаты расчета линейного коэффициента корреляции ( $r$ ) между рядами NDVI и концентрациями БаП для каждого поста наблюдения Уфы приведены в таблице. Видно, что значения  $r$  во всех случаях отрицательны, что говорит об обратной зависимости между NDVI и концентрациями. Анализ показал, что большинство коэффициентов корреляции значимы при уровне значимости  $2\alpha = 0,1$ . Низкие коэффициенты корреляции в 2016 году объясняются, полагаем, большим количеством пропусков в наблюдениях в этот период.



Станция 5, 2012 г.

Станция 14, 2012 г.

Рис. 4. Внутригодовая динамика NDVI и концентраций БаП в районе станций 5 и 14 за вегетационный период 2012 года

Значения коэффициента корреляции между NDVI концентрациями БаП, Уфа

Год	Станция 5	Станция 17	Станция 23	Станция 14	Станция 18
2012	-0,75	-0,60	-0,73	-0,67	-0,61
2013	-0,58	-0,59	-0,56	-0,50	-0,61
2014	-0,56	-0,53	-0,22	-0,63	-0,55
2015	-0,61	-0,58	-0,46	-0,62	-0,92
2016	-0,42	0,15	0,11	-0,60	0,26

Для анализа влияния отопительного сезона на динамику концентраций БАП для Уфы были получены графики включения отопления в 2012 году (рис. 5). Как можно видеть, в апреле 2012 года, когда отопительный сезон еще продолжался, концентрации БАП уже начинают снижаться (рис. 4). В октябре 2012 года, когда отопительный сезон уже начался, на станции 5 концентрации БАП не увеличиваются. Кроме того, тенденция к снижению концентраций БАП с ростом фитомассы прослеживается и в летний период, вне отопительного сезона.

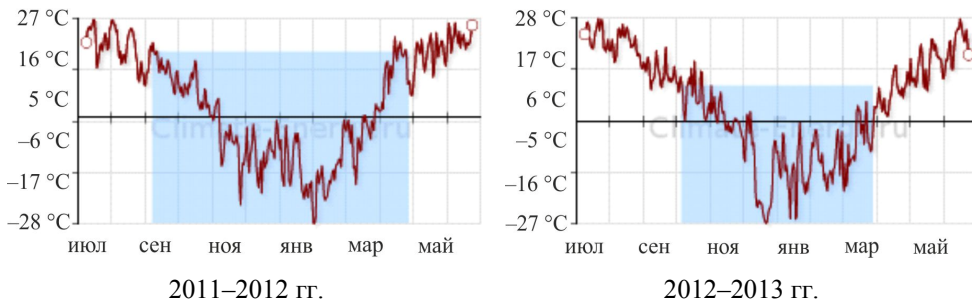


Рис. 5. Среднесуточная температура и отопительный период в Уфе

**Заключение.** С помощью статистических, картографических и визуальных методов анализа геоэкологической информации в работе выявлены временные и пространственные особенности формирования полей загрязнения воздуха БАП. Показана роль зеленых насаждений в формировании внутригодовой динамики и пространственного распределения полей загрязнения. Одним из значимых факторов формирования очагов аэрогенного риска, безусловно, является локация промышленных предприятий. Для обоих городов обнаружены устойчивые во времени зоны высоких концентраций канцерогенного вещества БАП вокруг крупных промышленных объектов. Однако это поле меняет свою форму в течение года. Во время вегетационного периода, с развитием растительности, изолинии концентраций БАП показывают высокие значения уже не в промышленных районах городов, а в жилых застройках. Это связано с тем, что промышленные районы имеют более высокие индексы NDVI, а значит, более высокую плотность зеленых насаждений и содержание в них хлорофилла, азота и влаги. Это оказывается решающим фактором в пространственно-временном распределении загрязнения воздуха. Так, если в Уфе до начала вегетации максимальные концентрации БАП формируют устойчивые зоны риска в северной промышленной части города, то на пике вегетационного периода происходит перераспределение зон с высокими концентрациями

БаП из индустриальной, но зеленой части города, в жилую, с крайне бедным озеленением.

Внутри жилых районов также происходит смещение опасных зон загрязнения БаП. В апреле поле максимального загрязнения в жилой застройке относится к ее центральной части, где высок уровень транспортного трафика. А в августе поле максимумов смещается к западу от центра, так как в центральной части города появляются зеленые зоны, а на западе они полностью отсутствуют.

Для всех шести станций наблюдений прослеживается четкая временная зависимость величин концентрации БаП от времени года. В период вегетации (с апреля по октябрь) во всех районах города происходит резкое снижение значений концентраций, достигая минимума в пик вегетации – июль–август. В среднем за 5 лет концентрации БаП летом не превышают значений ПДК. В зимний период концентрации примерно в 3 раза выше и, как правило, превышают ПДК.

Статистический анализ динамики значений NDVI и концентраций БаП также показал, что эти характеристики находятся в противофазе. Значения парного линейного коэффициента корреляции между рядами этих показателей во всех случаях отрицательны, что говорит об обратной зависимости между NDVI и концентрациями.

Проведен анализ влияния отопительного сезона на формирование динамики концентраций БаП. Картографический анализ показал, что ТЭЦ городов не вносят значительного вклада в формирование поля загрязнения атмосферы БаП.

#### Библиографический список

1. О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2016 году: Государственный доклад. – М.: Министерство природопользования и экологии Республики Башкортостан, 2017. – 316 с.
2. Состояние и охрана окружающей среды Архангельской области за 2015 год: Государственный доклад / под ред. С.В. Маслова. – Архангельск, 2016. – 432 с.
3. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M., Vlasov D.V. Benzo[a]pyrene in urban environments of eastern Moscow: pollution levels and critical loads // Atmospheric chemistry and physics. – 2017. – Vol. 17, iss. 3. – P. 2217–2227. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28363406>
4. Муллаярова П.И. Влияние зеленых насаждений на запыленность атмосферы городов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск: СГУГиТ, 2016. – Т. 2. – С. 89–93.
5. Блонская Л.Н., Зотова Н.А. Ландшафтно-экологическая характеристика зеленых насаждений г. Уфы. – Уфа: БашГАУ, 2015. – 59 с.
6. Феклистов П.А. Насаждения деревьев и кустарников в условиях урбанизированной среды г. Архангельска. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2004. – 112 с.

7. Погорелов А.В., Липилин Д.А. Зеленые насаждения города Краснодара. Оценка и многолетние изменения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2017. – № 3. – С. 192–205. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.03.15

8. Низамутдинов Т.И., Колесникова Е.В., Алексеев Д.К. Роль зеленых насаждений в снижении уровня риска для здоровья населения. В кн.: Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ / Сб. тезисов Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2020. – С. 767–769.

9. Применение вегетационных индексов для картографирования ландшафтов Большого Кавказа / В.В. Братков, И.В. Кравченко, Г.А. Туаев, З.В. Атаев, А.А. Абдулжалимов // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2016. – № 10(4). – С. 97–111.

10. Грехнев Н.И., Липина Л.Н., Усиков В.И. К вопросу оценки экологического риска с использованием метода дистанционного зондирования земли // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – 2015. – № 12 – С. 302–308.

11. Bäume und Pflanzen [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.die-gruene-stadt.de/baeume-inder-stadt.pdf> (дата обращения: 25.07.20).

12. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 148 с.

13. Спутниковое картографирование растительного покрова России / С.А. Бартаев, В.А. Егоров, В.О. Жарко, Е.А. Лупян, Д.Е. Плотников, С.А. Хвостиков, Н.В. Шабанов. – М.: ИКИ РАН, 2016. – 208 с.

14. Tucker C. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sensing of Environment. 1979. – Vol. 8, iss. 2. – P. 127–150.

15. Крюкова С.В., Симакина Т.Е. Оценка методов пространственной интерполяции метеорологических данных // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). – 2018. – № 1 (46). – С. 144–151.

## References

1. O sostoianii prirodnykh resursov i okruzhaiushchei sredy Respubliki Bashkortostan v 2016 godu [On the state of natural resources and the environment of the Republic of Bashkortostan in 2016]. Moscow. Ministry of Nature Management and Ecology of the Republic of Bashkortostan, 2017. 316s. (In Russian).

2. Sostoianie i okhrana okruzhaiushchei sredy Arkhangel'skoi oblasti za 2015 god: Gosudarstvennyi doklad / pod red. S.V. Maslova [State and environmental protection of the Arkhangelsk region for 2015] Arkhangel'sk, 2016. 432 p. ([In Russian]).

3. Kasimov Nikolay S., Kosheleva Natalia E., Nikiforova Elena M. and Vlasov Dmitry V., Benzo[a]pyrene in urban environments of eastern Moscow: pollution levels and critical loads. *Atmospheric chemistry and physics*. 2017. Vol. 17. Iss. 3 pp. 2217-2227 Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28363406>

4. Mullayarova P.I., Vliianie zelenykh nasazhdenii na zapylennost' atmosfery gorodov [The influence of green spaces on the dustiness of the atmosphere of cities] Interexpo Geo-Siberia. 2016. No. 2.

5. Blonskaya L.N., Zotova N.A. Landshaftno-ekologicheskaya kharakteristika zelenykh nasazhdenii g. Ufy [Landscape and ecological characteristics of green spaces in Ufa]. Ufa: BashGAU, 2015.11-13, 59 p. (In Russian)

6. Feklistov P.A. Nasazhdeniia derev'ev i kustarnikov v usloviakh urbanizirovannoi sredy g.Arkhangel'ska [Planting trees and shrubs in the urbanized environment of Arkhangel'sk] Arkhangel'sk. 2004. 112 p. (In Russian)

7. Pogorelov A., Lipilin D. Zelenye nasazhdeniia goroda Krasnodara. Otsenka i mnogoletnie izmeneniia [Green spaces of the Krasnodar city. Evaluation and multi-year changes]. *PNRPU. Applied ecology. Urban development*. 2017. No. 3. Pp. 192-205. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.03.15

8. Nizamutdinov T.I., Kolesnikova E.V., Alekseev D.K. Rol' zelenykh nasazhdenii v snizhenii urovnia riska dlia zdorov'ia naseleniia [The role of green spaces in reducing the level of risk to public

health]. Collection of theses of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 90th anniversary of the Russian State Hydrometeorological University. 2020 .pp. 767-769.

9. Bratkov V.V., Kravchenko I.V., Tuayev G.A., Ataev Z.V., Abdulzhalimov A.A. Primenenie vegetatsionnykh indeksov dlia kartografirovaniia landshaftov Bol'shogo Kavkaza [Application of vegetation indices for mapping the landscapes of the Greater Caucasus]. *Bulletin of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and exact sciences*. 2016; 10 (4): pp.97-111.

10. Grekhnev N.I., Lipina L.N., Usikov V.I. K voprosu otsenki ekologicheskogo riska s ispol'zovaniem metoda distantsionnogo zondirovaniia zemli [On the Issue of Environmental Risk Assessment Using the Earth Remote Sensing Method] *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*. 2015. No. 12. pp.302-308

11. Bäume und Pflanzen. Available at: <http://www.die-gruene-stadt.de/baeume-inder-stadt.pdf>.

12. Tokareva O.S. Obrabotka i interpretatsiia dannykh distantsionnogo zondirovaniia Zemli [Processing and interpretation of Earth remote sensing data: textbook] Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2010. 148 p. (In Russian)

13. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V. Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii [Satellite mapping of vegetation cover in Russia]. Moscow. 2016 . 208 p. (In Russian)

14. Tucker C. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 1979. Vol. 8. Iss. 2. pp. 127–150.

15. Kryukova S.V., Simakina T.E., Otsenka metodov prostranstvennoi interpolatsii meteorologicheskikh dannykh [Assessment of methods of spatial interpolation of meteorological data]. *Society. Wednesday. Development (Terra Humana)*. 2018. No.1 (46), pp.144-151 (In Russian)

Получено 01.02.2021

**T. Nizamutdinov, E. Kolesnikova, D. Alexeev**

## **INFLUENCE OF GREEN SPACES ON THE DYNAMICS OF AIR POLLUTION IN CITIES**

The article presents results of the analysis of spatial and temporal distribution of air pollution in two industrial cities, Ufa and Arkhangelsk. On the basis of satellite images of Earth remote sensing (ERS) for two cities, maps of spatial models of the distribution of the vegetation activity index NDVI were built for the main functional zones of the city: "residential buildings", "industrial areas", "recreational zones" and "highways" in areas with heavy traffic. It is shown that there is a rich "green fund" in Ufa represented by floodplain forests, forest parks, parks and squares. However, in the central part of the city, there are no green spaces with a high density of phytomass. Green spaces in Arkhangelsk have a much smaller specific area and density, the summer is colder here, and the growing season is short.

For the first time for Ufa, according to long-term daily observations of the UGMS, maps of the distribution of concentrations of the carcinogenic pollutant benzpyrene were built for each month of active growing season, hazardous zones for the health of citizens were identified. Isolines of benzpyrene concentrations are aligned with the distribution maps of the NDVI index. The analysis of the role of the green frame of the city in the formation of the spatial and temporal distribution of air pollution is given. It is shown that the most polluted, industrial areas of the city, before the beginning of the growing season, are characterized by the highest concentrations of benzpyrene in the city. However, with the development of vegetation in industrial zones, the concentration of benzpyrene

decreases, and in July-August it becomes lower than in the residential part of the city, where green spaces are practically absent. The research data are confirmed for the growing season of Arkhangelsk.

A statistical analysis of the data was carried out, which showed that for the entire territory of Ufa there is a clear time dependence of the benzpyrene concentration values on the season. During the growing season in all districts of the city, along with an increase in NDVI, there is a sharp decrease in the values of benzpyrene concentrations.

**Keywords:** green spaces, benzpyrene, remote monitoring, satellite images, the city of Ufa, the city of Arkhangelsk, remote sensing data, vegetation index NDVI, urban territories, industrial cities.

**Низамутдинов Тимур Ильгизович** (Санкт-Петербург, Россия) – аспирант кафедры «Прикладная экология», Санкт-Петербургский государственный университет (199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, e-mail: timur\_nizam@mail.ru)

**Колесникова Евгения Владимировна** (Санкт-Петербург, Россия) – доцент кафедры «Прикладная и системная экология», Российский государственный гидрометеорологический университет (192007, Санкт-Петербург, Воронежская улица, 79, e-mail: astra-j@mail.ru)

**Алексеев Денис Константинович** (Санкт-Петербург, Россия) – заведующий кафедрой «Прикладная и системная экология», Российский государственный гидрометеорологический университет (192007, Санкт-Петербург, Воронежская улица, 79)

**Timur Nizamutdinov** (St. Petersburg, Russian Federation) – Postgraduate Student of the Department of Applied Ecology, St. Petersburg State University (199034, St. Petersburg, 7/9 University emb., e-mail: timur\_nizam@mail.ru).

**Evgeniya Kolesnikova** (St. Petersburg, Russian Federation) – Associate Professor of the Department of Applied and Systems Ecology, Russian State Hydrometeorological University (192007, Voronezhskaya str., 79, e-mail: astra-j@mail.ru).

**Denis Alexeev** (St. Petersburg, Russian Federation) – Head of the Department of Applied and Systems Ecology, Russian State Hydrometeorological University (192007, Voronezhskaya str., 79).