

УДК 504.3.054

М. В. Оводков, В. Н. Азаров, В. В. Сухов

ФГБУ «ВНИИ Экология»

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФОВОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОНТРОЛЬНЫХ ТОЧЕК В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ КВОТИРОВАНИЯ ВЫБРОСОВ

Как известно, в настоящее время контрольные точки широко применяются при нормировании выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. В статье описан подход к оптимизации контрольных точек, играющих ключевую роль при квотировании выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, в рамках федерального проекта «Чистый воздух» и эксперимента по квотированию выбросов. В основу разработанного авторами подхода положены методы графового анализа нерегулярных сетей. Предложенный подход обеспечивает возможность определения репрезентативного оптимального набора контрольных точек, что является критически важным для эффективного квотирования выбросов. Для решения данной задачи авторами разработана программа для ЭВМ «ПоллютантГраф», автоматизирующая графовый анализ контрольных точек.

Настоящая статья подготовлена ФГБУ «ВНИИ Экология» в рамках выполнения экспертно-аналитической работы по государственному заданию Минприроды России № 051-00001-26-05 на 2026 год по теме «Подготовка экспертно-аналитических материалов, включающих подготовку предложений по методологическим подходам к разработке (расчету) установления нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, а также к порядку выдачи разрешений на временные выбросы».

Ключевые слова: контрольные точки, графы, загрязнение атмосферы, выбросы, квотирование.

Введение

Проблема загрязнения атмосферного воздуха в городах и промышленных центрах Российской Федерации не теряет актуальности. Согласно данным Росгидромета, в 2024 г. в 77 городах страны был зафиксирован высокий, а в 39 городах — очень высокий уровень загрязнения атмосферы¹. Анализ динамики совокупных валовых выбросов указывает на стагнацию этих показателей за последнее десятилетие, положительные тренды незначительны. При этом число городов с высоким и очень высоким уровнем загрязнения атмосферы растет².

Для принятия действенных мер по оздоровлению экологической обстановки в наиболее проблемных городах и промышленных центрах страны с 2019 г. реализуется федеральный проект «Чистый воздух» (далее — ФПЧВ), и в рамках данного проекта проводится эксперимент по квотированию выбросов на основе сводных расчетов загрязнения атмосферы (далее — Эксперимент). В периметр ФПЧВ входит 41 пилотный город. Согласно замыслу ФПЧВ и Эксперимента, модель управления качеством атмосферы в данных городах получила три важных нововведения:

- установлены целевые показатели снижения выбросов на 20 и 50 %, которые необходимо достигнуть в 2026 и 2036 г. соответственно;

¹ Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/90>.

² Там же.

- разработаны и реализуются комплексные планы снижения выбросов;
- реализуется экспериментальная модель квотирования выбросов на основе целевых показателей снижения выбросов и результатов сводных расчетов (СР) загрязнения атмосферы.

СР — это расчеты концентраций загрязняющих веществ (ЗВ) в приземном слое атмосферы в заданных контрольных точках города (КТ), учитывающие выбросы промышленных объектов, автомобильного транспорта и автономных источников теплоснабжения, выполняемые в целях исследования и прогноза загрязнения атмосферы в пилотных городах и для квотирования выбросов. Научно-методические основы СР наиболее подробно рассмотрены в работе [1] и ряде других работ.

Квотирование выбросов — это установление для специально выбранных квотируемых объектов дополнительных ограничений (квот) на максимальные разовые и валовые выбросы, определенных на основе СР и целевых показателей снижения выбросов.

Согласно методологии Эксперимента³, определение местоположения и количества КТ (далее — определение КТ) является ключевым этапом квотирования. КТ не привязываются к жесткой регулярной сетке (шагу), а выбираются логически. При этом от определения КТ зависят величины квот для квотируемых объектов⁴. Следовательно, для квотирования выбросов оптимальное определение КТ имеет первостепенное значение.

Настоящая статья посвящена предложенному авторами подходу к оптимизации КТ с применением графового анализа. Данный метод, рассматривая совокупность КТ в городе как нерегулярную сеть, позволяет анализировать связи между КТ, концентрациями ЗВ и объектами НВОС. Это дает возможность выделить из общей массы КТ наиболее представительные, которые необходимо использовать для квотирования.

Основная часть

Контрольные точки в управлении качеством атмосферы

Несмотря на критически важную роль КТ для квотирования, следует констатировать, что в действующей нормативно-методической базе Эксперимента порядок определения КТ описан весьма неоднозначно и допускает двоякое толкование. В связи с этим при проведении СР⁵ ФГБУ «ВНИИ Экология» была разработана и применена методика определения контрольных точек [2]. При этом нерешенным оставался вопрос оптимизации количества КТ, т. е. выделения из общей массы КТ наиболее представительных. Эта задача является весьма актуальной в связи с тем, что, во-первых, производительность официальных программно-аппаратных средств, используемых для проведения СР и квотирования, фактически достигла своего предела, и, несмотря на теоретическую допустимость включения в модель неограниченного количества КТ, возникает необходимость выделения наиболее репрезентативных КТ. Во-вторых, следуя логике управления выбросами, оптимизация

³ Об утверждении правил квотирования выбросов загрязняющих веществ (за исключением радиоактивных веществ) в атмосферный воздух : приказ Минприроды России от 29.11.2019 № 814.

⁴ Там же, п. 4.8.

⁵ Об утверждении правил проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха, включая их актуализацию : приказ Минприроды России от 29.11.2019 № 813.

КТ необходима в целях недопущения избыточной нагрузки на предприятия и объекты инфраструктуры, не влияющие на устойчивое сверхнормативное загрязнение атмосферы.

КТ применяются в воздухоохранной деятельности с момента введения в нашей стране официальной системы управления выбросами. В наиболее общем виде КТ — это однозначно определенное место на территории города с зафиксированной адресной или координатной привязкой, предназначенное для систематического инструментального или расчетного определения приземных концентраций ЗВ с целью мониторинга, контроля, нормирования или квотирования выбросов. В указанном контексте КТ приводятся в нормативно-методических документах, регламентирующих расчет рассеивания, организацию санитарно-защитных зон (СЗЗ), производственный экологический контроль (ПЭК) и государственный мониторинг, в том числе:

- Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе, утвержденные приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273.
- Правила установления СЗЗ и использования земельных участков, расположенных в границах СЗЗ, утвержденные постановлением Правительства РФ от 03.03.2018 № 222 (п. 12).
- Методика разработки (расчета) и установления нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, утвержденная приказом Минприроды России от 11.08.2020 № 581.
- ГОСТ Р 59059—2020. Охрана окружающей среды. Контроль загрязнений атмосферного воздуха. Термины и определения.
- Требования к мероприятиям по снижению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в периоды неблагоприятных метеорологических условий и их проведению при поступлении общих прогнозов неблагоприятных метеорологических условий или специализированных прогнозов неблагоприятных метеорологических условий (утв. приказом Минприроды России от 26.11.2025 № 651) (далее — Требования).

Примечательно, что в Требованиях законодатель сделал упор на применение КТ при снижении выбросов ЗВ при получении прогнозов неблагоприятных метеорологических условий (НМУ). Как видится, такой подход обеспечивает определенную преемственность с Экспериментом, в котором управление выбросами также осуществляется посредством управления вкладами в концентрации ЗВ в КТ. Это подтверждает ключевое место КТ в современных подходах к управлению качеством атмосферы. Однако необходимо подчеркнуть, что критерии определения КТ в Требованиях отсутствуют.

Развитие подходов к определению контрольных точек при проведении сводных расчетов и квотировании

Совместный анализ правил⁶ указывает на имеющуюся рассогласованность как в предназначении КТ, так и в критериях их определения.

⁶ Об утверждении правил квотирования выбросов загрязняющих веществ (за исключением радиоактивных веществ) в атмосферный воздух : приказ Минприроды России от 29.11.2019 № 814.

Об утверждении правил проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха, включая их актуализацию : приказ Минприроды России от 29.11.2019 № 813.

Для обеспечения системности и единообразия при определении КТ ФГБУ «ВНИИ Экология» разработана соответствующая методика, алгоритм которой представлен на рис. 1 [1, 2]. Данная методика позволила обеспечить единообразие в вопросе определения КТ на фоне рассогласованных подходов в указанных правилах.

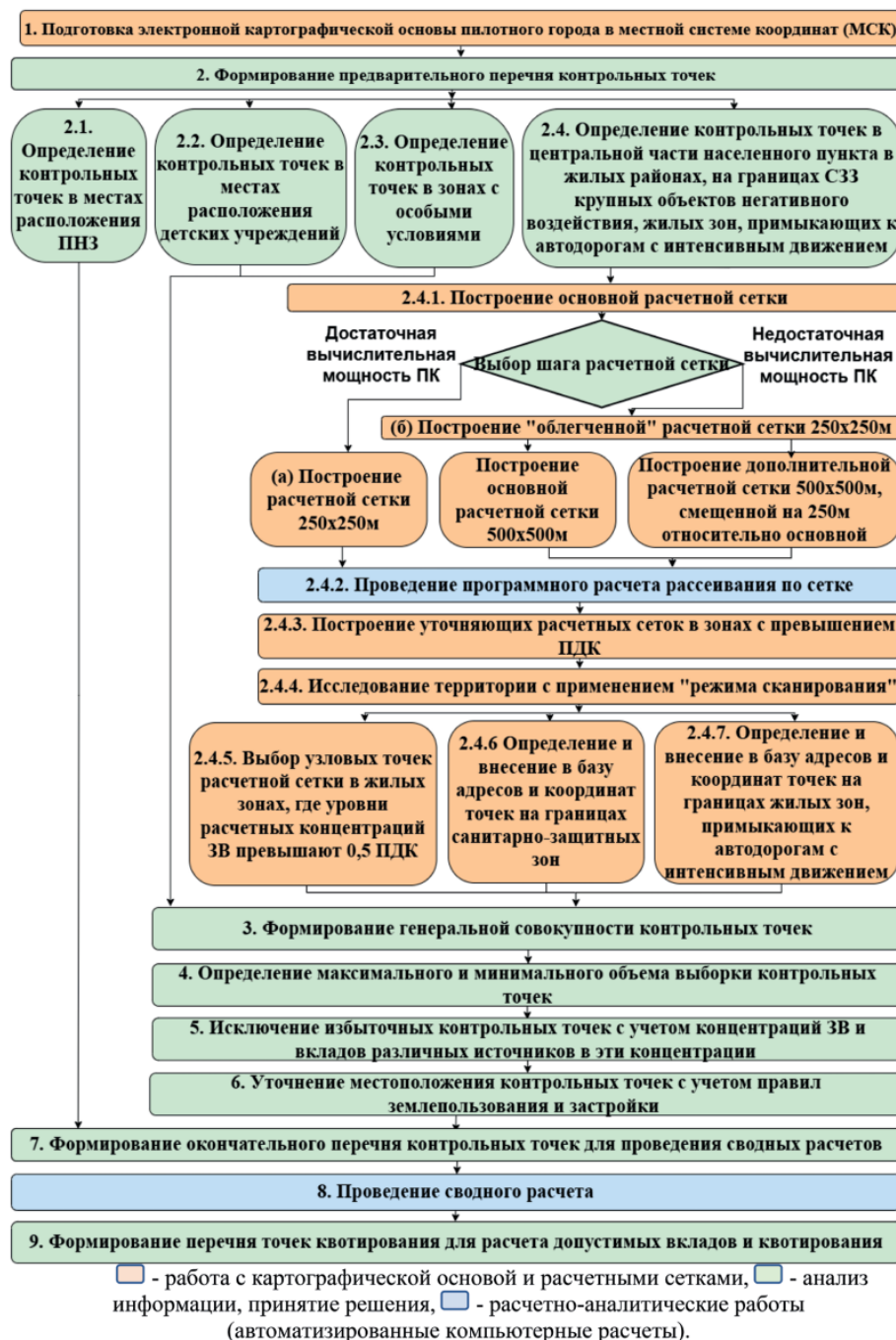


Рис. 1. Блок-схема методики определения КТ

Ввиду того, что критерии п. 3.2 правил, утвержденных приказом Минприроды России от 29.11.2019 № 814, предполагают формирование весьма обширной выборки КТ, предусмотрена процедура исключения избыточных КТ. Так, согласно п. 3.3 этих правил, КТ считается избыточной, если существует другая КТ, в которой для каждого источника вклады в концентрацию не меньше, чем вклады тех же источников в первой точке. После исключения избыточных КТ определяется расчетная совокупность КТ, для которой устанавливаются допустимые вклады в концентрацию. Таким образом формируются точки квотирования.

По мнению авторов, данный алгоритм отсева (оптимизации) избыточных КТ является несовершенным. Во-первых, он весьма сложен для практического выполнения; во-вторых, не определены критерии достаточности отсева; и, в-третьих, учитывается лишь фактор допустимого вклада в концентрацию. Вследствие этого возникла задача разработки эффективного инструмента для оптимизации КТ.

Применение графового анализа для оптимизации контрольных точек

Анализ имеющихся современных расчетно-аналитических инструментов показал, что для оптимизации КТ целесообразно применять методы сетевого анализа геопространственных данных [3, 4]. Сетевой анализ основывается на применении теории графов [5]. Под графом подразумевается набор точек («вершин»), соединенных линиями («ребрами») [5].

В рамках применения графового анализа для оптимизации массива КТ представим их как вершины (узлы) сети, а отрезки, соединяющие КТ (с учетом расстояний между ними), — как ребра (связи).

Одним из инструментов исследования свойств графа, применяемого для работы с КТ (далее — граф КТ), является кластерный анализ, который позволяет по определенным характеристикам найти тесно связанные группы КТ, которые, в свою очередь, образуют свои локальные графы. Например, все КТ внутри одного района, между которыми расстояния меньше, чем до КТ соседнего района (рис. 2). В данном случае имеются в виду два локальных кластера КТ, образованные на основании близости по расстояниям из основного графа.

Метрики графа (способ измерения расстояний между его вершинами на основе длины кратчайшего пути) позволяют определить общие характеристики и правильность его построения.

Рассмотрим основные метрики графа КТ.

Глобальная эффективность графа — это мера, определяющая значения величин кратчайших расстояний между узлами графа, рассчитываемая как среднее значение обратных величин кратчайших путей между всеми парами узлов. Высокая глобальная эффективность (близкая к 1) означает, что почти все узлы соединены напрямую или через очень короткие расстояния:

$$E(G) = \frac{1}{V(V-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d(i, j)}, \quad (1)$$

где V — количество узлов графа; $E(G)$ — глобальная эффективность исходного графа; $d(i, j)$ — кратчайшее расстояние между вершинами i и j .

Уязвимость графа — это степень его устойчивости к утрате отдельных узлов, т. е. способность графа поддерживать свою работоспособность при исключении узлов [6, 7].

Для расчета уязвимости графа требуется определить глобальную эффективность $E(G)$ до удаления узла (1) и после $E(G - v)$:

$$E(G - v) = \frac{1}{(V-1)(V-2)} \sum_{\substack{i \neq j \\ i, j \neq v}} \frac{1}{d(i, j)}, \quad (2)$$

где G — граф; V — количество вершин графа; $E(G)$ — глобальная эффективность исходного графа; $d(i, j)$ — кратчайшее расстояние между вершинами i и j ; v — номер удаляемого узла; $E(G - v)$ — глобальная эффективность графа после удаления узла v .

Расчет уязвимости отдельного узла ведется по формуле

$$\text{Vulnerability}(v) = E(G) - \frac{1}{(V-1)(V-2)} \sum_{\substack{i \neq j \\ i, j \neq v}} \frac{1}{d(i, j)}. \quad (3)$$

Алгоритмы центральности дают возможность определить самые важные КТ как в системе, так и в отдельном кластере. Какая КТ является ключевым узлом? В какой КТ улавливается наибольшее количество ЗВ? Это помогает найти самые значимые объекты в системе.

Алгоритмы сходства позволяют найти похожие КТ. Например, КТ с одинаковыми вкладчиками в загрязнение, одинаковыми наименованиями ЗВ и концентрациями, превышающими нормативы. Также проводится определение и «незаменимых» КТ, не подлежащих исключению из расчета. Определение КТ, исключение которых из расчета не приведет к снижению точности расчета. Выполнению этой задачи в наибольшей степени и посвящена настоящая статья.

Мощность узла показывает, со сколькими узлами связан рассматриваемый узел. В нашем случае это показывает, в какой степени данная КТ связана с окружающими КТ. Высокая мощность КТ может свидетельствовать о возможности заменить собой наибольшее количество соседних КТ. Высокая мощность группы расположенных рядом КТ может свидетельствовать об избыточной плотности их расстановки и, в частности, о возможности сокращения их числа.

Плотность графа — отношение количества связей в графе к максимально возможному:

$$\rho = \frac{2N}{V(V-1)}, \quad (4)$$

где V — количество вершин графа; N — количество ребер в графе.

К-функция по близости — функция, применяемая для анализа распределения точек в пространстве. Она определяет, насколько связаны друг с другом соседние узлы. Высокий коэффициент кластеризации указывает на то, что соседи узла также связаны друг с другом, образуя тесно связанное сообщество. И наоборот, низкий коэффициент кластеризации предполагает, что

соседи связаны более слабо, что может указывать на более случайную структуру внутри сети. На основании сравнения фактической K и K_{CSR} , соответствующей случайному распределению КТ, делается вывод о кластерном ($K_r > K_{CSR}$), случайном ($K_r \approx K_{CSR}$) или равномерном ($K_r < K_{CSR}$) распределении точек [7—12]. K -функция определяется по формуле

$$K_r = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^V \sum_{j \neq i}^V I(d(i, j) \leq r), \quad (5)$$

где V — количество узлов в графе; $d(i, j)$ — расстояние между точками i и j (напрямую, не учитывая связи); $I(d(i, j) \leq r)$ — индикаторная функция, равная 1, если расстояние между точками i и j меньше или равно r , и 0 в противном случае; r — радиус круга, внутри которого расположены все точки рассматриваемого кластера.

Модулярность Q — показывает, насколько хорошо граф можно разделить на кластеры — группы точек внутри графа, связанные лучше друг с другом, чем со всем остальным графом:

$$Q = \frac{1}{2N} \sum_{i,j} \left(A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2N} \right) \delta(c_i, c_j), \quad (6)$$

где A_{ij} — равно 1, если существует ребро между вершинами i и j , и 0 в противном случае; k_i — количество ребер, примыкающих к вершине i ; N — количество ребер в графе; $\delta(c_i, c_j)$ — дельта функция, которая равна 1, если вершины i и j принадлежат одному кластеру, и 0 в противном случае; c_i — кластер, к которому принадлежит вершина i .

В каждом графе, который характеризует отдельный кластер c_i , должны быть относительно низкая плотность, чтобы отслеживаемые параметры имели смысл, K -функция, говорящая о равномерном распределении КТ в c_i , чтобы убедиться в полном покрытии города, и высокая модулярность для обоснования последующего шага, а именно разбиения графа на кластеры по расстояниям и основным вкладчикам в концентрации ЗВ.

Максимальное расстояние, при котором КТ считаются расположенными в непосредственной близости R , принимается равным плотности расположения КТ в рассматриваемом городе, шт./км², и составляет от 0,5 до 2 км. Если плотность расположения КТ составляет менее 0,5 КТ на км², то значение R принимается равным 0,5, если плотность расположения КТ более 2 КТ на км², то значение R соответственно принимается равным 2.

Разбиение КТ на кластеры c_i и дальнейшая работа с полученными данными служат задаче выявления наименее представительных КТ внутри каждого из таких кластеров [12].

Для каждой из КТ можно выделить следующие три значимых критерия: количество источников выбросов ЗВ, обеспечивающих вклад в концентрацию ЗВ в данной КТ, количество ЗВ, концентрации которых наблюдаются в данной КТ, и концентрации указанных ЗВ.

Попарное сравнение КТ внутри отдельного кластера по указанным критериям позволяет выделить КТ наименее представительных каждого из таких кластеров, а дальнейшее сравнение — и города в целом.

Именно выявление наименее представительных КТ позволяет оптимизировать их количество, что и является итоговой целью применения описанного в настоящей статье подхода при учете отсутствия ухудшения качества СР, и повысить эффективность процедуры квотирования выбросов. Под качеством СР в данном случае понимается учет в рамках СР всех превышений ПДК по всем ЗВ на исследуемой территории.

Результаты графового анализа контрольных точек на примере пилотных городов федерального проекта «Чистый воздух»

Авторами настоящей статьи разработана программа «ПоллютантГраф», реализующая описанные выше принципы. Рассмотрим результаты применения программы для анализа КТ в одном из пилотных городов федерального проекта «Чистый воздух» — Ростове-на-Дону.

В первую очередь проводятся СР, в рамках которых определяются концентрации ЗВ в КТ Ростова-на-Дону и вклад отдельных предприятий в концентрации ЗВ в КТ. Данный расчет служит источником исходных данных для дальнейшего графового анализа. Также исходными данными служат перечень промышленных предприятий Ростова-на-Дону и КТ в указанном городе.

1. В программу загружаются необходимые данные — данные о концентрациях ЗВ в КТ, наименования предприятий и КТ, определяется плотность расположения КТ в исследуемом городе, проводится расчет.

2. Определяются основные метрики графа:

- плотность — 0,106, достаточная (менее 0,1);
- K -функция — $3,7 \cdot 10^8$ (ожидаемое $1,12 \cdot 10^9$), КТ распределены равномерно;
- модулярность — 51 %, достаточная (более 50 %).

Делается вывод о возможности разбиения графа на кластеры.

3. Проводится разбиение графа на кластеры и анализ полученных данных. Заведомо исключаются из расчета кластеры, состоящие из 1 КТ, так как их удаление ухудшит качество СР и квотирования.

На рис. 2 представлен один из примеров графического отображения промежуточных результатов работы программы «ПоллютантГраф». Различными цветами представлены КТ, составляющие один кластер. Красным выделены КТ, соответствующие ПНЗ и не подлежащие исключению из перечня КТ. Тонкими черными линиями обведены КТ, имеющие минимальные значения соответствующей характеристики.

При анализе результатов расчета по каждому из факторов выявлено, что:

- концентрации ЗВ, количество ЗВ и количество вкладчиков в концентрации ЗВ минимальны в КТ {11, 17, 30, 34, 39, 41, 47, 48, 63, 66, 70, 76, 83, 90, 91, 99, 105, 107, 108, 110, 114, 123, 184, 191, 195, 201, 202, 204, 235, 238, 239, 242, 247, 257};
- концентрации ЗВ и количество ЗВ минимальны в КТ {11, 17, 30, 34, 39, 41, 47, 48, 63, 66, 70, 76, 82, 83, 90, 91, 99, 105, 106, 107, 108, 110, 114, 123, 184, 191, 192, 195, 201, 202, 204, 208, 232, 235, 238, 239, 242, 247, 257};
- количество ЗВ и количество вкладчиков в их концентрации минимальны в КТ {8, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 24, 26, 30, 32, 33, 34, 38, 39, 40, 41, 43, 45, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 56, 58, 61, 62, 63, 66, 68, 70, 71, 72, 73, 75, 76, 77, 83, 89, 90, 91, 93, 96, 97, 98, 99, 100, 104, 105, 107, 108, 110, 114, 118,

120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 138, 142, 143, 148, 152, 158, 177, 179, 182, 184, 188, 189, 190, 191, 195, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 210, 211, 212, 213, 235, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 245, 246, 247, 248, 249, 254, 255, 256, 257, 258, 260};

- концентрации ЗВ и количество вкладчиков в их концентрации минимальны в КТ {11, 17, 30, 34, 39, 41, 47, 48, 63, 66, 70, 76, 83, 90, 91, 99, 105, 107, 108, 110, 114, 123, 184, 191, 195, 201, 202, 204, 235, 238, 239, 242, 247, 257}.

4. Проводится определение минимума по всем перечисленным факторам — таковой наблюдается в КТ {11, 17, 30, 34, 39, 41, 47, 48, 63, 66, 70, 76, 83, 90, 91, 99, 105, 107, 108, 110, 114, 123, 184, 191, 195, 201, 202, 204, 235, 238, 239, 242, 247, 257}.

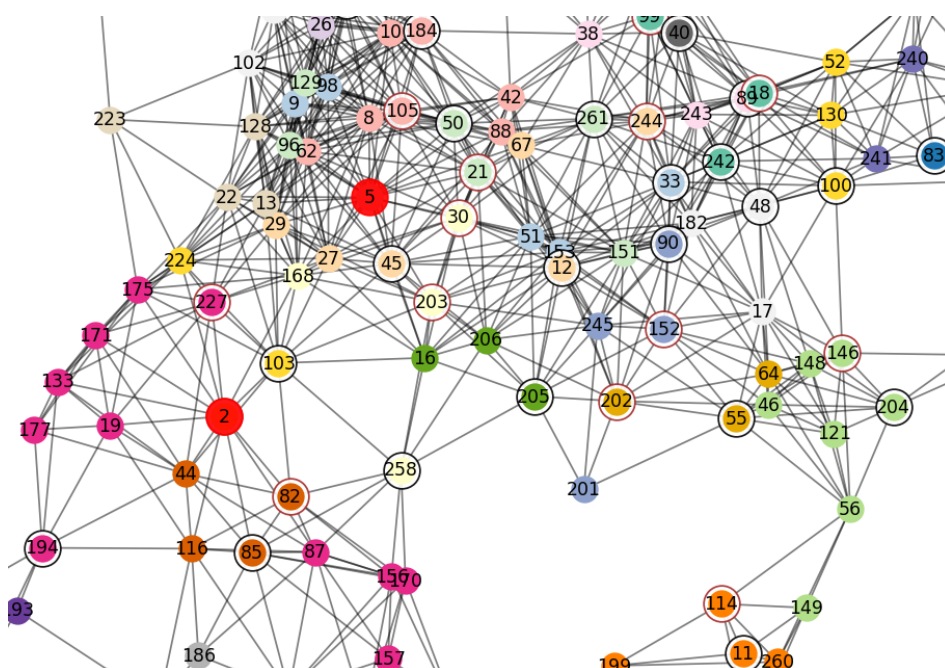


Рис. 2. Пример результатов графового анализа КТ по концентрации ЗВ на примере Ростова-на-Дону

Указанные КТ входят в перечень наименее представительных КТ, не соответствуют ПНЗ, следовательно, их исключение из расчета не повлечет за собой ухудшения качества СР и квотирования.

Таким образом, применение предложенного метода позволило снизить количество КТ в Ростове-на-Дону с 261 до 227, т. е. на 13 %. Это подтверждает, что выявление наименее представительных КТ позволяет оптимизировать их количество.

Заключение

Ключевая роль КТ как в действующей модели управления качеством атмосферного воздуха, так и в экспериментальной модели квотирования выбросов на территориях ФПЧВ не вызывает сомнений. Выбор для квотирования наиболее представительных КТ повышает эффективность квотирования,

позволяя определить минимально допустимое их количество. Такой подход также способствует минимизации избыточных вычислительных нагрузок, связанных с квотированием.

При этом явно прослеживается вектор природоохранного государственного регулирования, направленный на дальнейшее усиление роли КТ. Подтверждением этому служат введенные новые требования к реагированию предприятий на прогнозы НМУ: от целей управления выбросами на источниках предприятия теперь требуется управлять концентрациями (вкладами) ЗВ в КТ.

Следует указать на важность установления КТ при разработке нормативов допустимых выбросов ЗВ для объектов негативного воздействия (ОНВ). Согласно п. 35 приказа Минприроды России «Об утверждении методики разработки (расчета) и установления нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух»⁷, в случае отсутствия официальных данных о фоновом уровне загрязнения атмосферного воздуха эта информация может быть получена на основе результатов сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха в КТ вблизи от конкретного объекта ОНВ.

В условиях отсутствия однозначных критериев определения КТ ФГБУ «ВНИИ Экология» разработало методологию определения КТ. Частью этой методологии является алгоритм оптимизации КТ, для реализации которого была разработана специальная расчетно-аналитическая методика, основанная на графовом анализе нерегулярных сетей, и создана компьютерная программа для автоматизации расчета и анализа.

По результатам применения предложенного подхода на примере Ростова-на-Дону была установлена избыточность 13 % ранее определенных КТ. Аналогичный результат был получен и по другим пилотным городам ФПЧВ.

Диапазон применения предложенного подхода не ограничивается задачами квотирования. С учетом введения новых требований к реагированию на прогнозы НМУ и наращивания применения сводных расчетов, предложенный подход может быть адаптирован к задачам определения КТ для целей разработки планов мероприятий по снижению выбросов в периоды НМУ, а также для развития действующей сети мониторинга загрязнения атмосферы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Закондырин А. Е., Оводков М. В., Петров В. О., Шаргатова З. И. Научно-методологические основы сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха : моногр. М. : Ваш формат, 2025. 272 с.
2. Оводков М. В., Петров В. О., Ткачев М. А., Азаров В. Н. Методический подход к определению количества и местоположения контрольных точек для проведения сводных расчетов и квотирования выбросов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 4(72). С. 174—189. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2024-4-174-189. EDN: FIQYGW.
3. Пилецкий И. И., Батура М. П., Шилин Л. Ю. Графовые технологии в интеллектуальной системе комплексного анализа данных интернет-источников // Докл. БГУИР. 2020. Вып. 18(5). С. 89—97. URL: <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-89-97>.
4. Ратнер С. В. Сетевой анализ среды функционирования в задачах регионального экологического менеджмента // Проблемы управления. 2016. № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/setevoy-analiz-sredy-funktsionirovaniya-v-zadachah-regionalnogo-ekologicheskogo-menedzhmenta>.

⁷ Об утверждении методики разработки (расчета) и установления нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух : приказ Минприроды России от 11.08.2020 № 581.

5. Дворкин Д. К. Графы: введение в теорию и приложения. URL: https://logic.pdmi.ras.ru/~dvk/graphs_dk.pdf.
6. Faragó A., Mojaveri Z. In search of the densest subgraph. 2019. URL: <https://www.mdpi.com/1999-4893/12/8/157>.
7. Chatterjee A., Diwakar R. V. Efficiency, vulnerability, and centrality in graphs. 2015. URL: <https://ijpam.eu/contents/2015-103-1/5/5.pdf>.
8. Dixon P. The K-Function in spatial statistics. URL: <https://www3.nd.edu/~mhaenggi/ee87021/Dixon-K-Function.pdf>.
9. Barthelemy M. The structure and dynamics of networks. 2010. URL: https://www.stat.berkeley.edu/~aldous/157/Papers/barthelemy_survey.pdf.
10. Borgatti S. P., Foster P. The network paradigm in organizational research: a review and typology // Journal of Management. 2003. Vol. 29. Iss. 6. Pp. 991—1013.
11. Newman M. E. J. The structure and function of complex networks // SIAM Review. 2003. Vol. 45. Iss. 2. Pp. 167—256.
12. Barton D. N., Lindhjem C. Network analysis in ecology: a review of methods and applications // Ecological Modelling. 2015. Vol. 297. Pp. 1—12.

© Оводков М. В., Азаров В. Н., Сухов В. В., 2026

Поступила в редакцию
11.05.2026

Ссылка для цитирования:

Оводков М. В., Азаров В. Н., Сухов В. В. Применение графового анализа для оптимизации контрольных точек в экспериментальной модели квотирования выбросов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2026. Вып. 3(104). С. 252—263. DOI: 10.35211/18154360_2026_3_252.

Об авторах:

Оводков Михаил Владимирович — канд. техн. наук, руководитель научно-методического центра экологического моделирования, прогнозирования и оценок ФГБУ «ВНИИ Экология». Российская Федерация, 117628, г. Москва, 36 км МКАД, двлд. 1, стр. 4; m.ovodkov@vniiecolgy.ru

Азаров Валерий Николаевич — д-р техн. наук, проф., глав. науч. сотр. научно-методического центра экологического моделирования, прогнозирования и оценок ФГБУ «ВНИИ Экология». Российская Федерация, 117628, г. Москва, 36 км МКАД, двлд. 1, стр. 4; azarovpubl@mail.ru

Сухов Всеволод Вадимович — канд. фил. наук, младший научный сотрудник научно-методического центра экологического моделирования, прогнозирования и оценок ФГБУ «ВНИИ Экология». Российская Федерация, 117628, г. Москва, 36 км МКАД, двлд. 1, стр. 4; v.suhov@vniiecolgy.ru

Mikhail V. Ovodkov, Valerii N. Azarov, Vsevolod V. Sukhov

VNII Ekologiya

APPLICATION OF GRAPH ANALYSIS METHODS TO OPTIMIZE CONTROL POINTS IN AN EXPERIMENTAL MODEL OF EMISSION QUOTAS

FSBI “Russian Research Institute for Environmental Protection” within the framework of the state assignment No. 051-00001-26-05 expert and analytical materials have been prepared on the preparation of proposals on methodological approaches to the development (calculation) of the establishment of standards for permissible emissions of pollutants into atmospheric air, as well as the procedure for issuing permits for temporary emissions.

The article describes an approach to optimizing control points that play a key role in air pollutant emission quotas within the framework of the federal Clean Air project and the emission quota experiment. The approach developed by the authors is based on graph analysis methods of irregular networks. The proposed approach makes it possible to determine a representative optimal set of control points, which is critically important for effective emission quotas, taking into account the features

of the experimental quota model. To solve this problem, a computer program "Pollutant Graph" has been developed that automates the analysis of control points according to the methodology developed by the authors.

Key words: control points, graph analysis, atmospheric air pollution, emissions, quotas.

For citation:

Ovodkov M. V., Azarov V. N., Sukhov V. V. [Application of graph analysis methods to optimize control points in an experimental model of emission quotas]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2026, iss. 3, pp. 252—263. DOI: 10.35211/18154360_2026_3_252.

About authors:

Mikhail V. Ovodkov — Candidate of Engineering Sciences, VNII Ekologiya. 1/4, 36 km MKAD, Moscow, 117628, Russian Federation; m.ovodkov@vniiecolgy.ru

Valerii N. Azarov — Doctor of Engineering Sciences, Professor, VNII Ekologiya. 1/4, 36 km MKAD, Moscow, 117628, Russian Federation; azarovpubl@mail.ru; ORCID: 0000-0003-0944-0232

Vsevolod V. Sukhov — Junior Research Fellow, VNII Ekologiya. 1/4, 36 km MKAD, Moscow, 117628, Russian Federation. v.suhov@vniiecolgy.ru; ORCID: 0009-0004-3995-5151