



УДК 504.3.054(571.53)

## **Загрязнение атмосферного воздуха предприятиями теплоэнергетики г. Иркутска**

А. В. Аргучинцева ([arg@math.isu.ru](mailto:arg@math.isu.ru))

И. Г. Годвинская

А. В. Ахтиманкина

**Аннотация.** На основе математических моделей дана оценка загрязнения города предприятиями теплоэнергетики с учетом климатических особенностей местности. Приводится сравнение результатов расчетов с данными стационарных постов слежения за состоянием воздушного бассейна.

**Ключевые слова:** источники загрязнения, атмосфера, предельные допустимые концентрации, моделирование, климатические особенности.

### **Введение**

Атмосферный воздух является неотъемлемой частью среды обитания всего живого, включая человека. Особенности географического положения определили специфичную атмосферную циркуляцию в районе Иркутска, куда почти не поступают ни атлантические, ни тихоокеанские воздушные массы. Рельеф сильно расчленен долинами крупных водоемов и их притоков, что создает особые микроклиматические условия в пределах города и в той или иной мере накладывает отпечаток на общую циркуляцию атмосферы. В течение года в Иркутске преобладают ветры юго-восточного и северо-западного направлений, чему способствует ориентация долины р. Ангары (повторяемость этих направлений по многолетним данным 28 % и 32 % соответственно).

В Иркутске более 150 промышленных предприятий, включающих около 3000 антропогенных источников, выбрасывающих в атмосферу почти 120 различных ингредиентов. Государственный мониторинг за качеством атмосферного воздуха проводится не более, чем по 15 % ингредиентам. Примерно 70 % источников относятся к организованным (оснащенным вентиляционным оборудованием), из которых только 20 % имеют газоочистные установки. Поэтому для города проблема загрязнения атмосферы весьма актуальна, так как вследствие высокой техногенной нагрузки (особенно в отопительный сезон, который длится почти восемь месяцев) по отдельным ингредиентам наблюдаются концентрации, в несколько раз превышающие узаконенные нормы. К тому же, почти не учитывается частный сектор с печным отоплением. В настоящее время вклад частного сектора в суммарные выбросы условно оценивается в от 2 до 3 %. Однако, учитывая

большие площади, занимаемые частным сектором, очень низкие трубы печей, произвольность выбора топлива (вплоть до мусора, включающего вредные компоненты), а также отсутствие конкретных работ по количественному определению выбрасываемых загрязнителей, представляется недооцененным вклад этих источников в атмосферное загрязнение.

Надо отметить, что нормативы предельных допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ для того и разрабатываются, чтобы они выполнялись. Однако на протяжении ряда лет по состоянию атмосферного воздуха г. Иркутск относят к группе самых загрязненных городов России и, как следствие, это находит отражение в ослаблении защитных сил организма (сдвиг иммунного статуса), специфических заболеваниях населения, ранней потери трудоспособности, генетических перестройках, врожденных аномалиях, перинатальной смертности, патологиях беременности и родов.

**Используемый материал.** Основной вклад в выбросы вносят стационарные источники предприятий теплоэнергетики (их в городе около 140), причем на Ново-Иркутскую ТЭЦ приходится почти 44 % от валового количества выбросов всех источников теплоэнергетики. Продукты сгорания органического топлива (в частности, угля) содержат загрязняющие вещества I, II и III классов опасности. Вещества I класса опасности (ряд полициклических ароматических углеводородов, соединения микроэлементов бериллия, свинца, никеля, кобальта, ртути и др.) обладают канцерогенной и мутагенной активностью, воздействуя, в первую очередь, на человека и животных. Вещества II класса опасности – оксиды азота, соединения марганца, меди, кадмия и пр. – обладают сильными токсическими свойствами. Основными ингредиентами, выбрасываемыми в зимний период источниками предприятий теплоэнергетики, являются: диоксид серы – в среднем около 3 кг/с, диоксид азота – до 0,7 кг/с, оксид азота – свыше 0,1 кг/с, моноксид углерода – около 0,3 кг/с, диоксид кремния – более 0,6 кг/с, а также значительно в меньших количествах – бенз(а)пирен, взвешенные вещества, зола, сажа, фенол, аммиак, пропан, марганец и др. Большинство источников работают без газоочистных установок (около 63 %), имеют очень низкие трубы (около 17 % – до 15 м, свыше 77 % – до 30 м, 97 % – до 45 м), и только две трубы Ново-Иркутской ТЭЦ имеют высоты 180 и 250 м. Поэтому все выбросы попадают в основном в приземный слой атмосферы, где потенциальные условия для их рассеяния намного хуже, чем в пограничном слое.

Все необходимые материалы по стационарным источникам выбросов представлены по данным инвентаризации 2008 г. Управлением по охране окружающей среды и экологической безопасности комитета по жилищно-коммунальному строительству администрации г. Иркутска.

Кроме параметров источников выброса, в качестве входной информации используются многолетние восьмисрочные наблюдения (с 1973 г.), проводимые метеорологическими станциями и постами в г. Иркутске.

## Методы обработки исходного материала

Материал многолетних восьмисрочных гидрометеорологических данных (1973–2009 гг.) подвергался статистической обработке, согласно которой наблюдения за скоростью ветра, проводимые в полярной системе координат, представлялись в локальной прямоугольной декартовой системе координат с разложением вектора скорости на скалярные компоненты. Далее, рассчитывались по каждой компоненте вектора скорости ветра все основные степенные начальные, центральные и смешанные моменты, на основе которых для каждого месяца строились многомерные функции плотности распределения вектора скорости ветра как климатические характеристики изучаемого региона.

Как правило, в России и за рубежом расчеты по оценке загрязнения атмосферы антропогенными источниками проводят по моделям, позволяющим находить абсолютные концентрации ингредиентов при каких-то определенных метеорологических условиях (например, при усредненных параметрах среды, конкретной синоптической или наиболее часто реализуемой ситуации в данной местности и пр.). Однако решение, полученное по усредненным параметрам, и усреднение самих решений для различных параметров не совпадают. Более того, решение по усредненным параметрам вообще может не соответствовать ни какой из фактически имеющих место ситуаций.

Загрязнение г. Иркутска предприятиями теплоэнергетики оценивалось как на основе программ гостированной методики ОНД-86 [3], так и по авторской модели [1], позволяющей с учетом климатических особенностей местности рассчитывать вероятность превышения критериев (например, ПДК – предельных допустимых концентраций), установленных для различных ингредиентов. Обычно для вычисления вероятности реализации интересующего события, необходимо рассматривать множество решений, соответствующих различным комбинациям случайных параметров и краевых условий (начальных и граничных), а затем уже полученные решения усредняют. В данной модели функция плотности вероятностей ставится во взаимно однозначное соответствие потенциальному множеству всех решений в фазовом пространстве параметров среды. Чтобы пояснить сказанное, поставим перед собой задачу ответить на вопрос, как часто в течение рассматриваемого отрезка времени будет нарушаться выбранный критерий. Из множества решений выбираем то его подмножество, которое обеспечивает нарушение критерия. Естественно, что такому подмножеству решений отвечает и какое-то подмножество случайных параметров среды. Используя оператор перехода, определяем область интегрирования функции плотности вероятностей по выделенному подмножеству случайных параметров, и тем самым оцениваем частоту (или вероятность) реализации опасных условий.

Решение поставленной задачи особенно упрощается, если воспользоваться аналитическими решениями полуэмпирического уравнения переноса и турбулентной диффузии примеси. Все аналитические решения полу-

чены в предположении, что скорость ветра и коэффициенты турбулентной диффузии либо постоянны, либо изменяются с высотой по степенному закону. Решение при логарифмическом профиле ветра представляет определенные трудности. Эти трудности, как правило, обходят, аппроксимируя логарифмический профиль ветра степенным и подбирая показатель степени так, чтобы в определенной области значений степенная функция была возможно ближе к логарифмической. Несмотря на то, что все аналитические решения получены при определенных упрощениях процессов, возможности их значительно расширяются, если взаимно однозначно связать распределение примесей с вероятностными интегральными и дифференциальными функциями распределения гидрометеорологических параметров.

В качестве исходного уравнения используется уравнение переноса и турбулентной диффузии примеси для анизотропных сред

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial u_i s}{\partial x_i} + \alpha s = F + \frac{\partial}{\partial x_i} k_{ij} \frac{\partial s}{\partial x_j}, \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $i, j, k = \overline{1, 3}$  – номер координаты декартовой прямоугольной системы координат  $(x, y, z)$ ,  $u_i$  – компонента скорости среды по соответствующей координате  $x_i$ ,  $s$  – концентрация загрязняющей субстанции;  $\alpha$  – коэффициент распада примеси; главные оси тензора турбулентной диффузии совпадают с координатными осями ( $k_{ij} = 0$ , если  $i \neq j$ ;  $k_{ij} = k_i$ , если  $i = j$ );  $F = F(t, x_i)$  – функция, описывающая источники выбрасываемой субстанции. Уравнение (1) записано в тензорном виде, а потому по дважды повторяющимся индексам в одночленном выражении производится суммирование в пределах изменения этих индексов.

Уравнение (1) не является замкнутым относительно своих неизвестных. В зависимости от условий замыкания и постановки начальных и граничных условий возникают различные математические модели. В частности, для расчетов вероятности превышения концентраций каких-либо заданных уровней удобно воспользоваться аналитическим решением, полученным, например, М. Е. Берляндом [2] при упрощениях: примесь пассивна и консервативна, движение стационарно, ось  $x_1 = x$  ориентирована в направлении ветра, вертикальные движения в атмосфере малы по сравнению с горизонтальными, диффузионный поток примеси вдоль направления ветра значительно меньше конвективного. В этом случае аналитическое решение для точечного источника высотой  $H$  при граничных условиях

$$F(y, z) = Q\delta(y)\delta(z - H) \text{ при } x = 0,$$

$$s = 0 \text{ при } z \rightarrow \infty, \quad |y| \rightarrow \infty,$$

$$k_z \frac{\partial s}{\partial z} = 0 \text{ при } z = 0$$

имеет вид:

$$s = \frac{Q \left( \frac{u_1}{x} \right)^{3/2} H^{n+\lambda/2} z_1^{1-n}}{2(1+n) \sqrt{\pi k_o} k_1 z^{\lambda/2}} \exp \left[ -\frac{u_1 y^2}{4k_o x} - \frac{u_1 (H^{1+n} + z^{1+n}) z_1^{1-n}}{(1+n)^2 k_1 x} \right] \times \int_{\lambda_1} \left[ \frac{2u_1 (Hz)^{\frac{1+n}{2}} z_1^{1-n}}{(1+n)^2 k_1 x} \right]. \quad (2)$$

Здесь  $\delta$  – дельта-функция Дирака,  $I$  – функция Бесселя мнимого аргумента,  $n$  – безразмерный коэффициент для интерполяции вертикального профиля скорости ветра,  $Q$  – величина, пропорциональная интенсивности источника;  $\lambda = \frac{w_g z_1}{k_1}$ ;  $\lambda_1 = \lambda / (1+n)$

$$u = u_1 (z / z_1)^n, \quad k_z = k_1 (z / z_1), \quad k_y = k_o u,$$

$u_1$  и  $k_1$  – соответственно скорость ветра и коэффициент турбулентного обмена по вертикали на высоте  $z_1$ ;  $k_o = const$ , имеющая размерность длины и должна согласовываться с шагом расчета и модулем скорости ветра.

Для наземной концентрации, ограничиваясь первым членом разложения функции Бесселя, имеем:

$$s = \frac{0,5 M u_1^{\lambda_1} z_1^{\lambda_1 + \lambda_2}}{(1+n)^{\lambda_1 + \lambda_2} (k_1 x)^{\lambda_2} \sqrt{\pi k_o x} \Gamma(\lambda_2)} \exp \left[ -\frac{y^2}{4k_o x} - \frac{u_1 H^{1+n} z_1^{1-n}}{(1+n)^2 k_1 x} \right]. \quad (3)$$

Здесь  $\Gamma$  – гамма-функция,  $\lambda_2 = 1 + \lambda_1$ .

Заметим, что решения (2)–(3) можно использовать как при условиях однородного рельефа, так и при малых его уклонах, когда воздушный поток практически полностью обтекает неровности местности. В последнем случае уравнение (1) записывают в криволинейных координатах  $(x', y', z')$ , причем координатная поверхность  $x'Oy'$  повторяет форму рельефа, а  $z' = z - \Delta(x, y)$ , где  $\Delta(x, y)$  – функция, описывающая рельеф местности.

В случае легкой примеси принимается  $w_g = 0$ .

Несмотря на упрощения реальных физических процессов, использование полученного аналитического решения очень сильно выигрывает за счет того, что реализация алгоритма проводится во вращающейся вслед за ветром системе координат по всем его возможным модульным значениям, рассчитываемым по принципу шкалы Бофорта.

## Выполненные расчеты

Проведена оценка вклада выбросов источников теплоэнергетики в общее загрязнение атмосферы по ингредиентам: зола мазута, пропанель, фенол, аммиак, бенз(а)пирен, демитиламин, взвешенные вещества, сажа, оксид азота, диоксид серы, диоксид азота, диоксид кремния, оксид углерода.

Расчеты проводились для месяцев-представителей года: для зимнего периода (декабрь – январь), когда в Иркутске устанавливается Азиатский антициклон, создающий неблагоприятные условия для рассеяния примесей в связи с большой повторяемостью штилевых и инверсионных ситуаций; весеннего (апрель – май), – когда циклоническая деятельность атмосферы наиболее способствует ее очищению, особенно в дневные часы, и летнего, – когда нагрузка на отопительные агрегаты заметно сокращается.

В качестве критерия нормирования загрязняющего ингредиента рассматривается ПДК. В стандартных методиках обычно в качестве ограничительного критерия рассматривают максимальную разовую концентрацию (ПДК<sub>м.р.</sub>), что не является оправданным, так как ПДК<sub>м.р.</sub> рассчитана на 20–30-минутное пребывание в опасной зоне. Предельная допустимая средняя суточная концентрация (ПДК<sub>с.с.</sub>) рассчитана на селитебную зону, т. е. для местности постоянно проживающего населения.

Приведем отдельные фрагменты расчетов по программам стандартной методики (ОНД-86) и авторской. Расчеты показывают, что в декабре по аммиаку, демитиламину, мазутной золе, пропаналу, фенолу от источников предприятий теплоэнергетики не возникают концентрации выше соответствующих допустимых норм; по неорганической пыли и взвешенным веществам – превышение ПДК<sub>с.с.</sub> до 150 и 170 ч в месяц соответственно; по бенз(а)пирену), оксиду азота – превышения незначительны (не более 48 ч в месяц).

Для лучшей ориентации на рисунках дана основная речная сеть города. Черными точками обозначены источники теплоэнергетики. На рис. 1 абсолютные концентрации диоксида азота приведены в долях ПДК<sub>м.р.</sub> = 0,2 мг/м<sup>3</sup>. Изолиния с обозначением 0,2 охватывает область, внутри которой концентрации ингредиента не менее ПДК<sub>с.с.</sub> = 0,04 мг/м<sup>3</sup>. На рис. 2 приведена вероятность превышения ПДК<sub>с.с.</sub>. Для лучшего восприятия вероятности нормированы на количество часов в месяце, и изолинии проведены с шагом 24 ч (сутки).

Особо неблагоприятная ситуация складывается на северо-западе города, где вблизи источников выброса абсолютные концентрации диоксида азота могут превышать в 1,6 раза ПДК<sub>м.р.</sub> и в восемь раз ПДК<sub>с.с.</sub>, а население свыше 500 ч в месяц дышит воздухом, не удовлетворяющим экологическим стандартам. Диоксид азота – буро-желтая жидкость. Образуется при сжигании топлива. В процессах горения образуется 95–100 % NO, который окисляется в воздухе до NO<sub>2</sub> атмосферным озоном. NO<sub>2</sub> сильно токсичен, оказывает общетоксическое, раздражающее, аллергенное действия, вызывает головокружение, бронхопнемонию, судороги, сердцебиение, раздражение слизистой оболочки, кожи, дыхательных путей, уменьшает содержание гемоглобина в крови. При воздействии на окружающую среду NO<sub>2</sub> приводит к разрушению некоторых материалов, снижению урожайности в сельском хозяйстве, поглощению солнечного света, образованию коричневой дымки, которая является одним из компонентов фотохимических туманов – смогов.

Проведены сравнения результатов расчетов с данными усредненных за многолетний декабрь (2005–2009 гг.) измерений за содержанием в городском воздухе диоксида азота, проводимых на стационарных пунктах наблюдений (ПНЗ) Иркутского межрегионального территориального управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (рис. 3). Видно, что посты наблюдений отмечают фактически постоянное превышение ПДК<sub>с.с.</sub>. Расчеты не противоречат данным интегральных наблюдений. К сожалению, для NO<sub>2</sub> в 2005 г. произошло изменение ПДК<sub>м.р.</sub> с 0,085 до 0,2 мг/м<sup>3</sup>, т. е. ее увеличение в 2,5 раза.

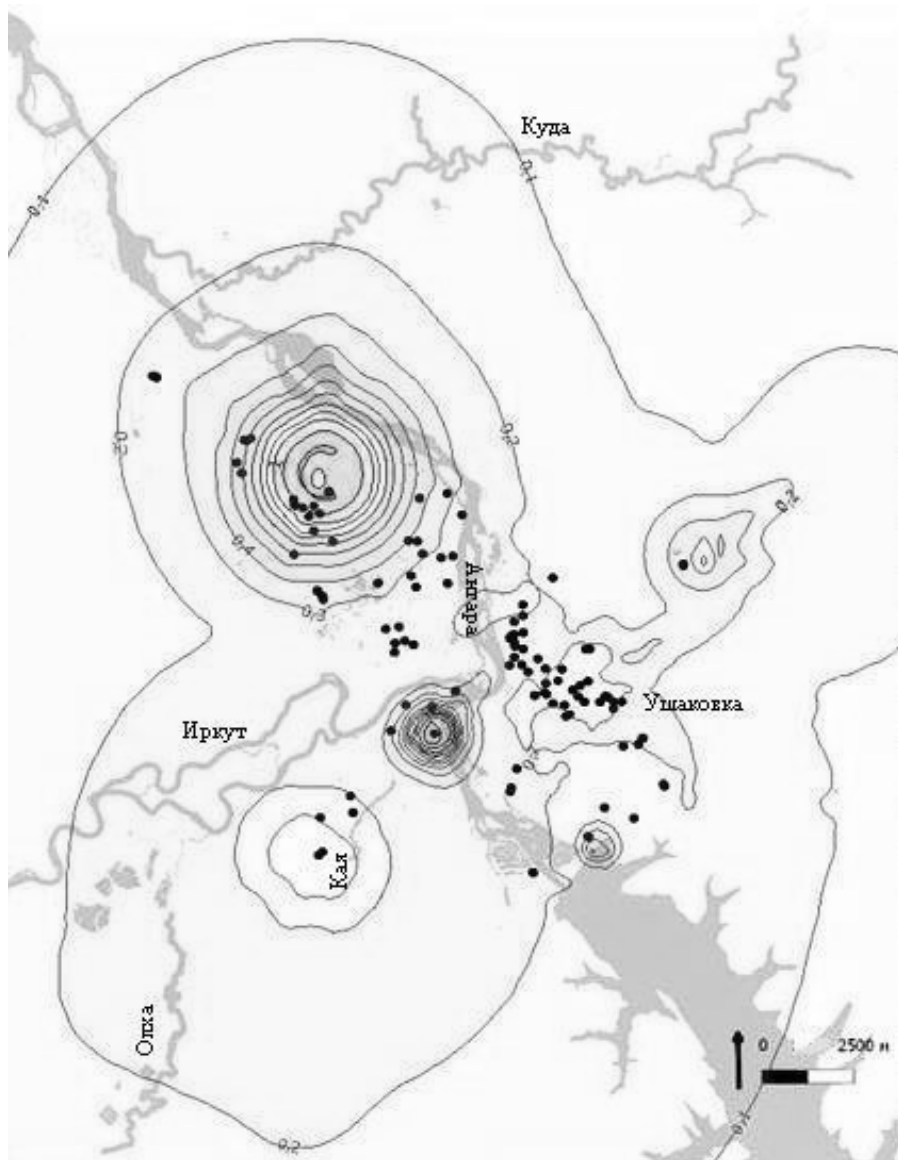


Рис. 1. Изолинии абсолютных концентраций диоксида азота в декабре

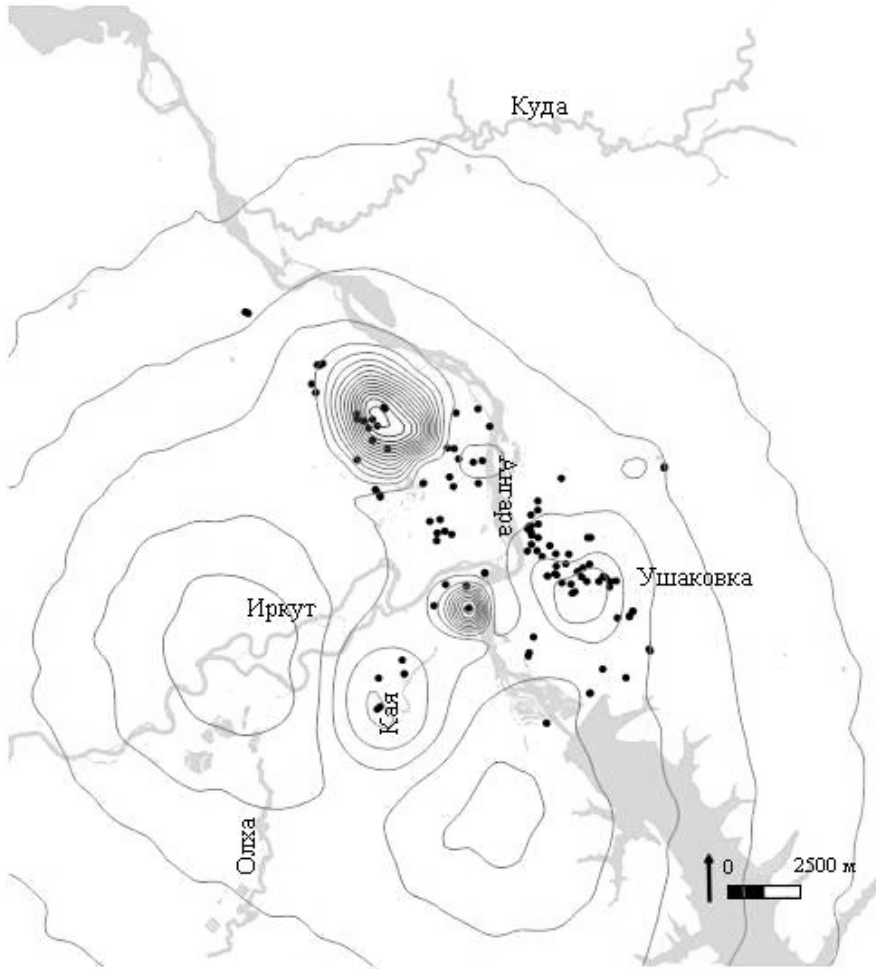


Рис. 2. Изолинии частот превышения ПДК<sub>с.с.</sub> диоксида азота в декабре

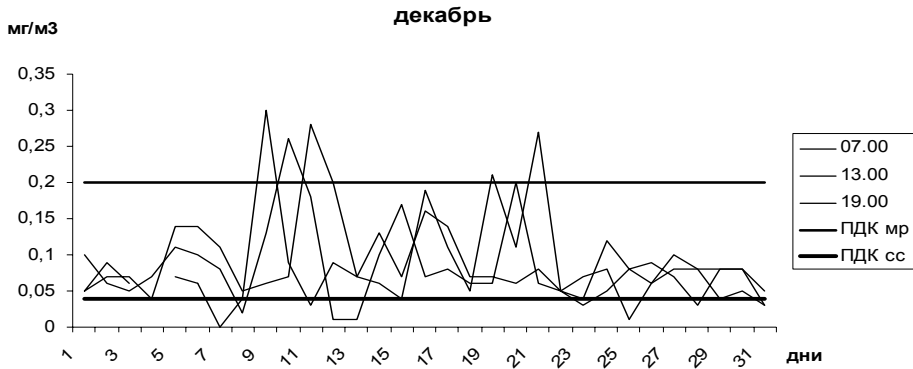


Рис. 3. Усредненные данные стационарных постов наблюдений за диоксидом азота в декабре



На рис. 4 и 5 приведены аналогичные расчеты, но для сажи (ПДК<sub>м.р.</sub> = 0,15 мг/м<sup>3</sup> и ПДК<sub>с.с.</sub> = 0,05 мг/м<sup>3</sup>). Начиная с линии, обозначенной 0,3 (см. рис. 4), возникает область превышения концентрации сажи выше ПДК<sub>с.с.</sub>. Согласно расчетам по авторской модели (см. рис. 5), в отдельных районах около 400 ч население, проживающее вблизи источников теплоэнергетики, подвергается воздействию повышенных концентраций сажи.

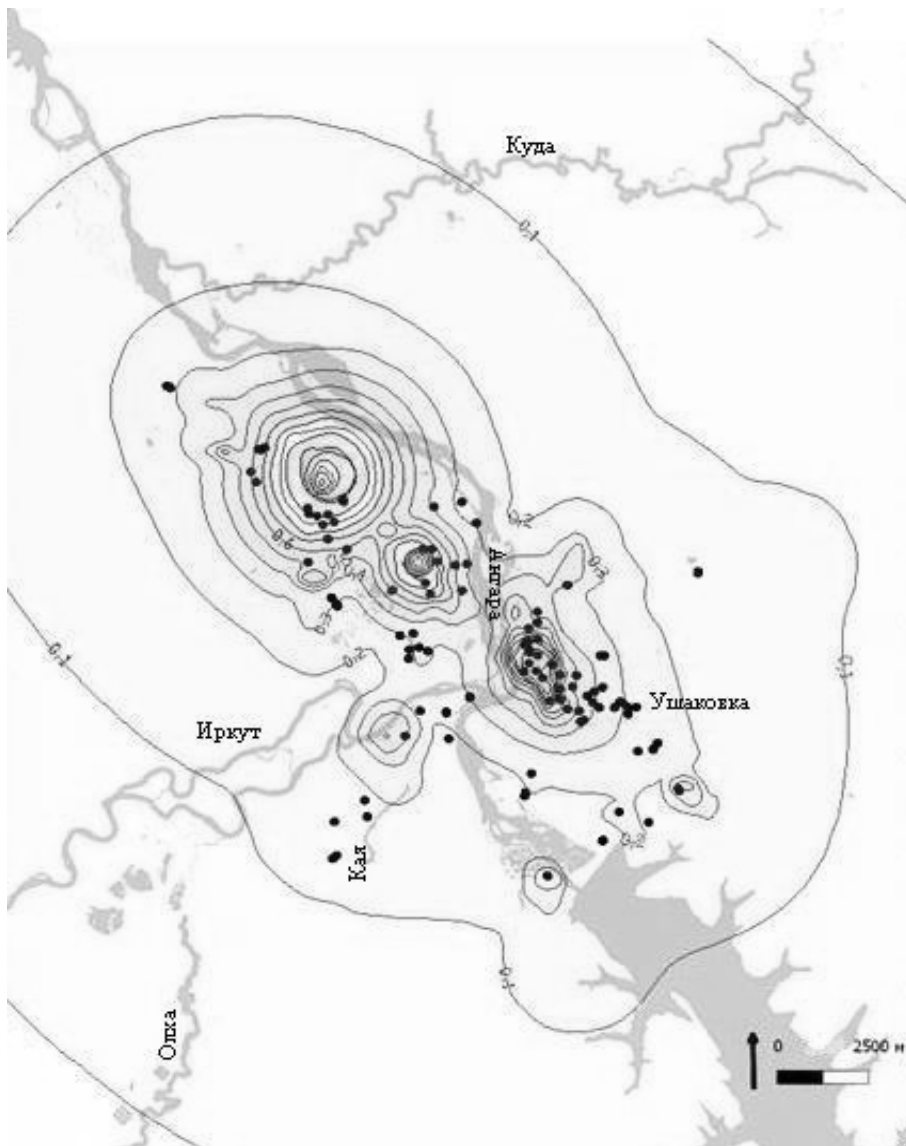


Рис. 4. Изолинии абсолютных концентраций сажи в декабре

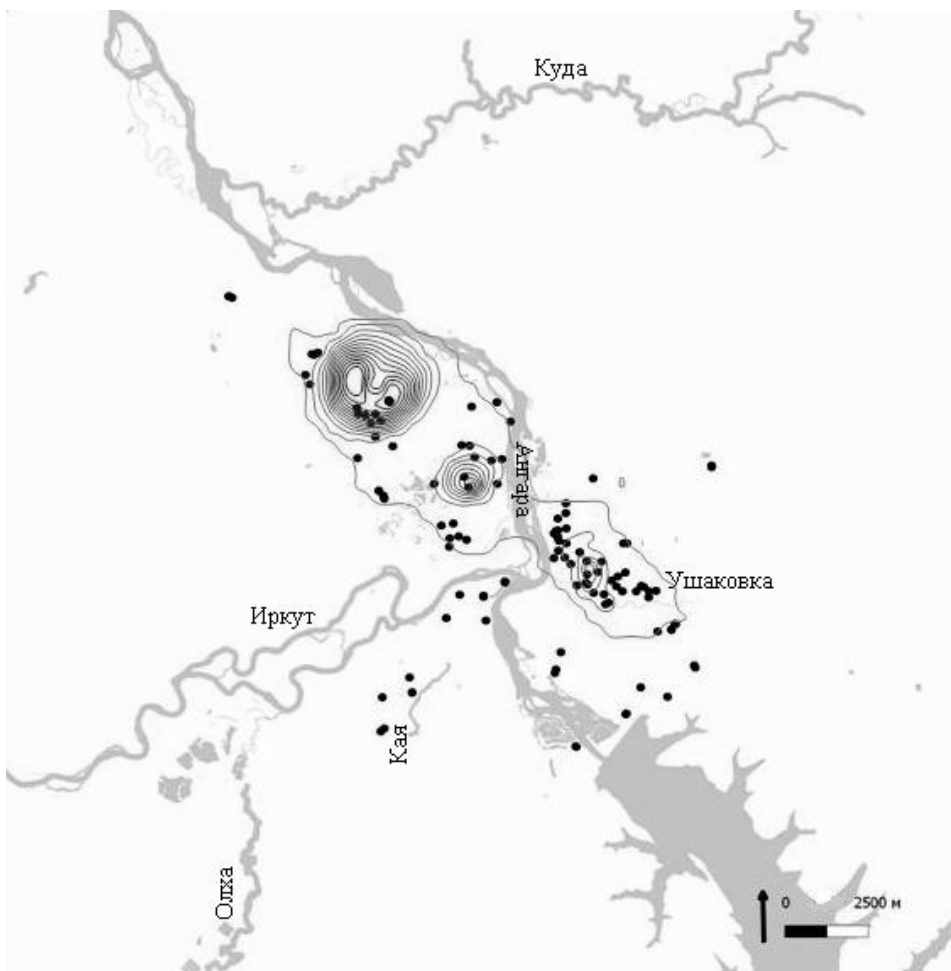


Рис. 5. Изолинии частот превышения ПДК<sub>с.с.</sub> сажи в декабре

Диоксид серы (рис. 6 и 7) представляет собой газ с острым запахом, характеризуется средней растворимостью в воде (ПДК<sub>м.р.</sub> = 0,5 мг/м<sup>3</sup>, ПДК<sub>с.с.</sub> = 0,05 мг/м<sup>3</sup>). В водном растворе диоксид серы имеет кислую реакцию. Общий характер действия на организм проявляется в раздражении преимущественно верхних дыхательных путей, а при более сильном воздействии – также и глубоких дыхательных путей. Вопрос о токсическом действии на весь организм еще неясен: есть указания на раздражающее действие SO<sub>2</sub> на кроветворные органы (костный мозг, селезенка), нарушение углеводного обмена. У человека уже очень малые концентрации действуют на слизистые оболочки. Вдыхание более высоких концентраций приводит к охриплости, болям и чувству стеснения в груди, бронхиту; при более длительном воздействии наблюдается также рвота, речь и глотание затруднены. Очень высокие концентрации приводят к острому бронхиту,

одышке, быстро наступающим расстройствам сознания. Порогом восприятия для человека является концентрация  $6 \text{ мг/м}^3$ . При концентрации  $20\text{--}30 \text{ мг/м}^3$  начинается раздражение в горле, при  $50 \text{ мг/м}^3$  – кашель и раздражение глаз. При  $60 \text{ мг/м}^3$  наблюдается сильное чихание. Эта концентрация является максимальной, выносимой в течение получаса без серьезного вреда.

При длительном вдыхании наблюдаются такие заболевания, как хронические катары дыхательных путей (в частности бронхов) и конъюнктивиты, подвергаются разрушению зубы.

Вредное действие диоксида серы резко увеличивается при наличии в атмосфере диоксида азота и повышении влажности.

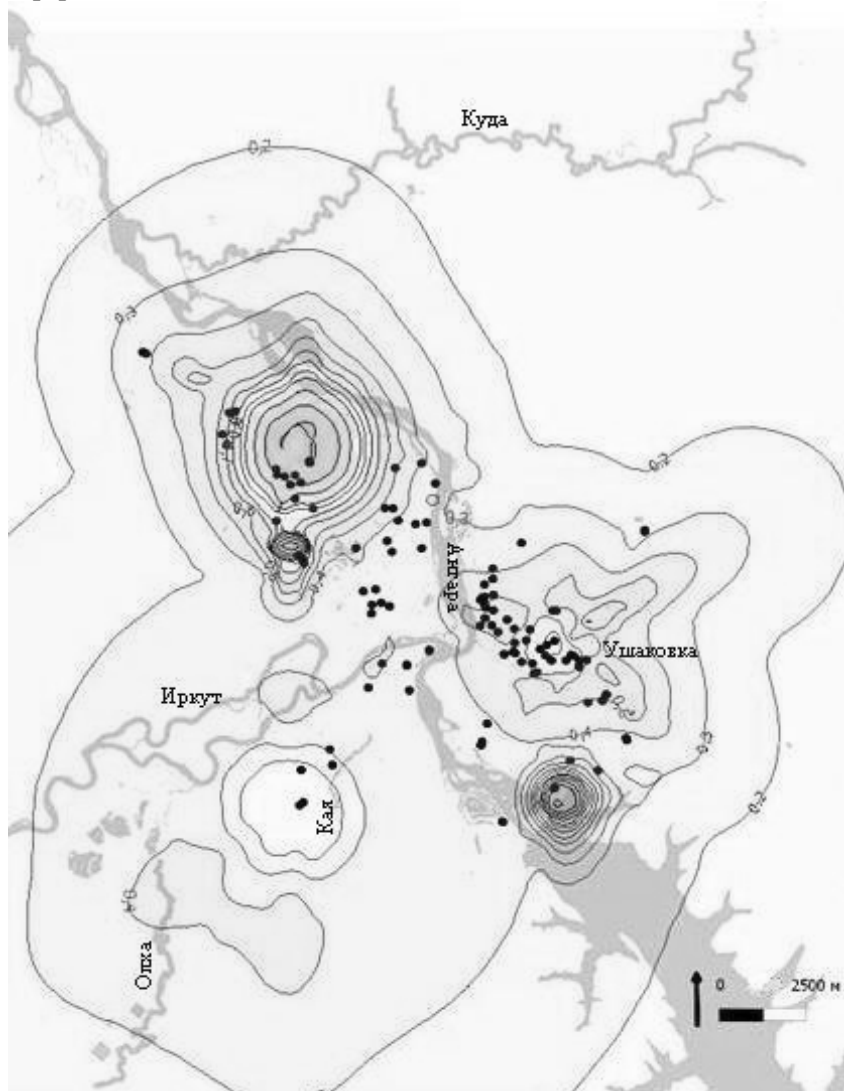


Рис. 6. Изолинии абсолютных концентраций диоксида серы в декабре

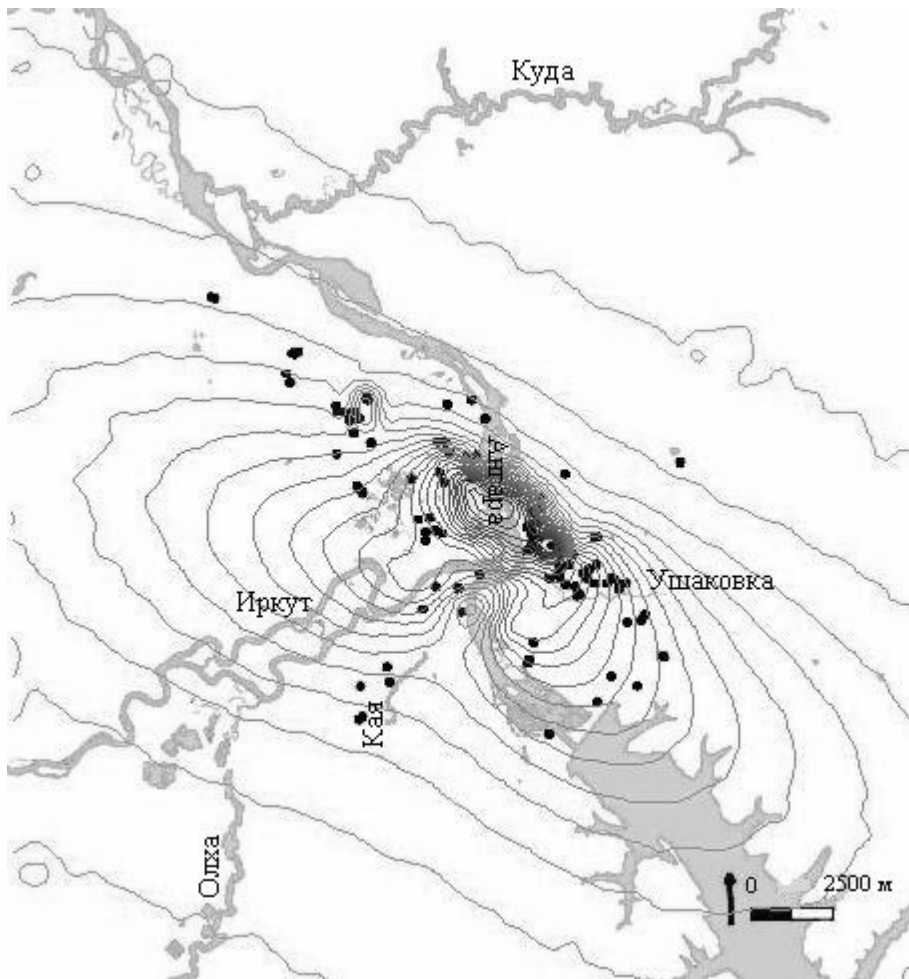


Рис. 7. Изолинии частот превышения ПДК<sub>с.с.</sub> диоксида серы в декабре

Следующая серия рисунков (рис. 8 и 9) демонстрирует расчеты органической пыли соответственно в долях от абсолютных ПДК<sub>м.р.</sub>=0,15 мг/м<sup>3</sup> и частоту превышения ПДК<sub>с.с.</sub>= 0,05 мг/м<sup>3</sup>. Область от изолинии 0,3 к центру рисунка (см. рис. 8) указывает на превышение ПДК<sub>с.с.</sub>. Однако это превышение может быть с небольшой вероятностью (частотой). Далее (см. рис. 9) показано, что в отдельных районах это превышение может достигать до 250 ч в месяц.

Твердые частицы (пыль) образуются при сжигании топлива в промышленных и бытовых установках. Химические процессы взаимодействия с окружающей средой и воздействие на здоровье человека зависят от химического состава и размера твердых частиц. Твердые частицы способствуют снижению солнечного освещения и видимости, увеличению облачности и туманности, разрушению и загрязнению материалов. Возможно снижение температуры земли в результате длительного воздействия.

При сравнении двух месяцев (декабрь и июль) можно заметить, что в зимний месяц содержание пыли в воздухе выше, чем в летний месяц примерно в 1,5 раза.

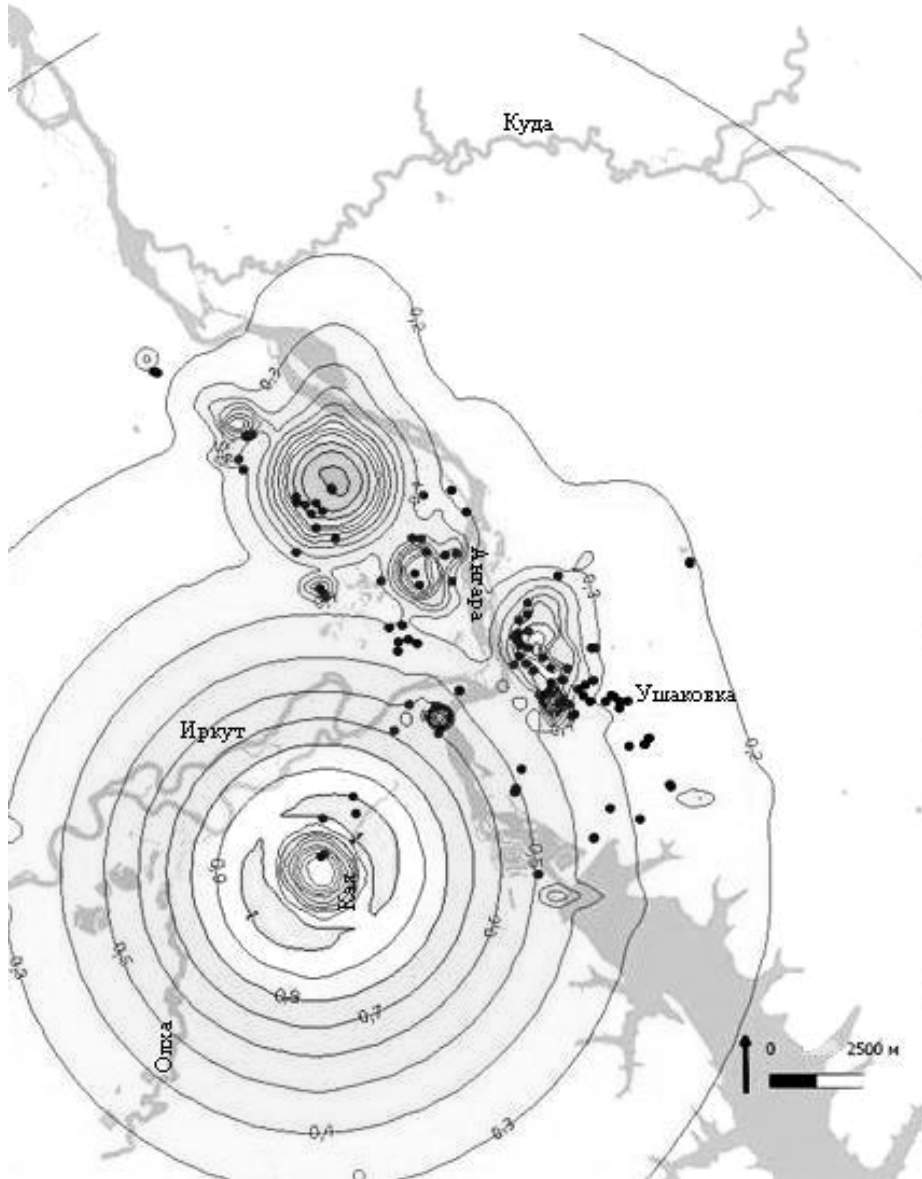


Рис. 8. Абсолютные концентрации пыли в декабре

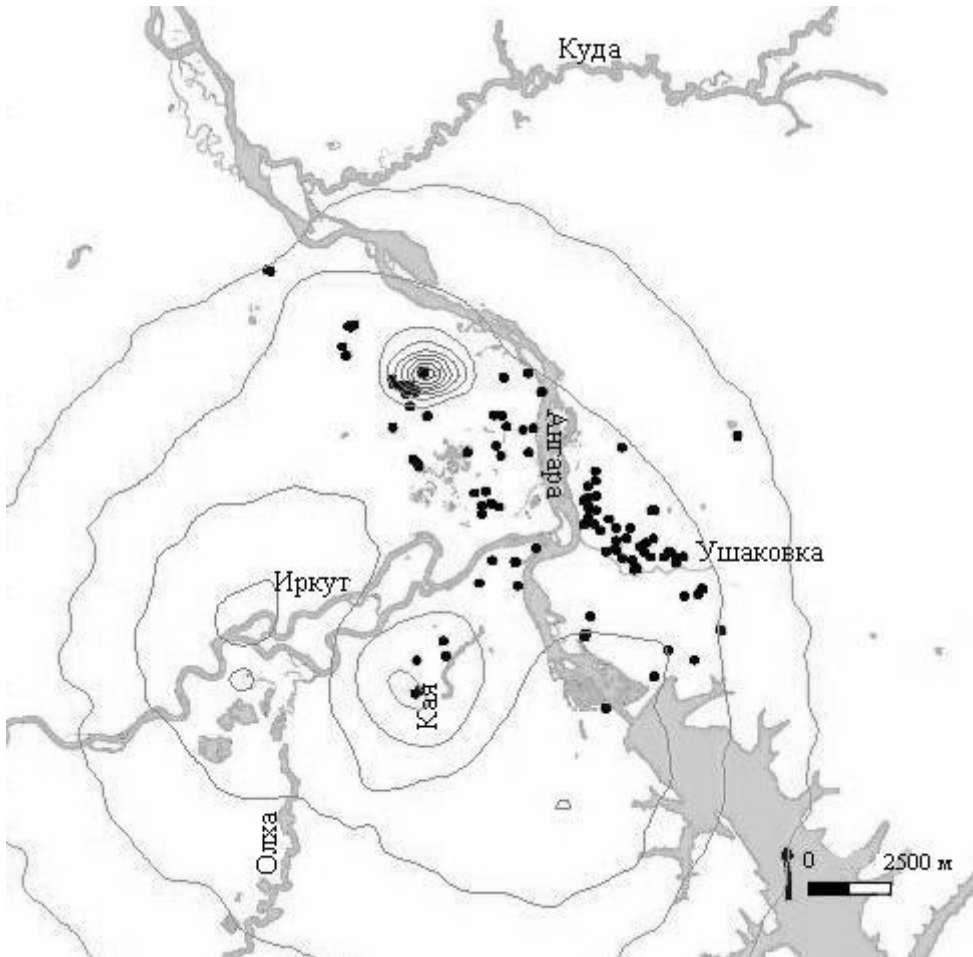


Рис. 9. Изолинии частот превышения ПДК<sub>с.с.</sub> пыли в декабре

## Выводы

Приведенные результаты расчетов по различным методикам показывают, что экологическая обстановка в городе не соответствует установленным критериям, предъявляемым к качеству воздуха. Особенно наибольшие уровни загрязнения воздушного бассейна отмечаются в зимние месяцы – месяцы наибольшей отопительной нагрузки и наименьшей способности атмосферы к самоочищению из-за климатических особенностей. Администрации органов местного самоуправления необходимо разработать контролирующие функции за деятельностью предприятий в части соблюдения экологического законодательства и принятия действенных мер по оздоровлению экологической обстановки в городе, улучшению качества атмосферного воздуха.

### Список литературы

1. *Аргучинцев В. К.* Моделирование мезомасштабных гидрометеорологических процессов и переноса антропогенных примесей в атмосфере и гидросфере региона оз. Байкал / В. К. Аргучинцев, А. В. Аргучинцева. – Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2007. – 255 с.
2. *Берлянд М. Е.* Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Л. : Гидрометеоиздат, 1975. – 448 с.
3. Унифицированная программа расчета загрязнения атмосферы «ЭКО центр». ООО «ЭКО центр» : руководство пользователя по методике ОНД-86. – Воронеж, 2010. – 28 с.

## **Air pollution caused by Irkutsk powerplants**

A. V. Arguchincheva, I. G. Godvinskaya, A. V. Akhtimankina

**Annotation.** In the research mathematical models, those consider climatic features of the area were used. Air pollution of the city was estimated on the basis of these models. Comparison of results of calculations with data stationary site is provided.

**Key words:** sources of pollution, atmosphere, maximum allowable concentration, modeling, climatic features.

*Аргучинцева Алла Вячеславовна  
доктор технических наук, профессор  
Иркутский государственный университет  
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
тел.: (3952) 42-56-84*

*Годвинская Ирина Геннадиевна  
кандидат географических наук  
начальник отдела природопользования и  
программ Управления по охране  
окружающей среды и экологической  
безопасности Комитета по жилищно-  
коммунальному хозяйству  
администрации г. Иркутска  
664000, г. Иркутск, ул. Марата, 14  
тел.: (3952) 52-04-22*

*Ахтиманкина Анастасия Владимировна  
студентка 5-го курса  
Иркутский государственный университет  
тел.: 89501353509*