

УДК 504.3.054:002.53(571.52)

© Л.Х. Тас-оол, Ю.А. Калуш, С.А. Чупикова

Л.Х. Тас-оол, Ю.А. Калуш, С.А. Чупикова

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ПРИМЕРЕ Г. КЫЗЫЛА



Введение

В современном мире в большинстве урбанизированных территорий ведется мониторинг выбросов вредных веществ (поллютантов) в атмосферу. Данные такого мониторинга могут отображать реальное состояние атмосферы только в пунктах наблюдений; для получения информации о качестве атмосферного воздуха в произвольной точке местности необходимо раскрыть зависимости между процессами распространения загрязнений или конструировать сложную экологическую и географическую систему города. Моделирование количественных взаимосвязей между разнообразными экологическими факторами, такими, как природа элемента загрязнителя, вид источника выбросов, характеристики метеоусловий, параметры ландшафта и др., позволяет углубить представления о механизмах действия этих факторов и принять адекватные решения по снижению нагрузки антропогенных воздействий.

Настоящая работа посвящена изучению пространственной и временной изменчивости качества воздушной атмосферы г. Кызыла путем построения и анализа 3D-моделей геосистемы города с использованием данных мониторинга снегового покрова как индикатора состояния атмосферы.

Город Кызыл расположен в узкой межгорной котловине, вытянутой с востока на запад, с высотами от 600 до 700 метров над уровнем моря, вдоль русла реки Енисей и ее притоков Большой Енисей и Малый Енисей. Устойчивый снежный покров держится 90-110 суток, средняя температура января -29°C , в сильные морозы опускается до -50°C и более; более половины зимнего сезона является штилевым, ветра слабые, средняя скорость ~ 1 м/с. Перечисленные географические и климатические особенности обуславливают появление в атмосфере «инверсионной крыши» (рис. 1), препятствующей циркуляции воздушных масс, сносу и рассеиванию выбросов.

Материалы и методы

Объектом моделирования явился процесс накопления пылевых частиц дымовых выбросов в снеговом покрове (индикатора загрязнения воздушной атмосферы) в зимний отопительный период, в период сжигания больших объемов топлива в угле-

сжигающих установках (ТЭЦ, котельные, домашние печи), размещенных по всей территории г. Кызыла.

В качестве главного параметра модели, определяющего степень загрязнения атмосферы, выбрана сухая масса пылевых частиц, осевших на 1 квадратный метр снегового покрова в сутки, – $\text{мг}/\text{м}^2\cdot\text{сутки}$; нормирование параметра выполнено для учета отличий в мощности и длительности сохранения устойчивого снежного покрова в разные годы. Количественные данные о привнесении в атмосферу пылевых загрязнений выбирались из банка данных мониторинга химического состава снегового покрова в г. Кызыле. Пробы снега отбирали в соответствии с руководством по контролю загрязнения атмосферы [1] со всей глубины залегания снежного покрова в начале марта (период максимального снегозапаса), затем растапливали в стеклянных емкостях при комнатной температуре.

Пылевую фракцию снега, сформированную из нерастворимых в воде неорганических компонентов угля и хлопьев сажи (продукта неполного сгорания угля) [2], отделяли фильтрованием через беззольные фильтры «синяя лента» и высушивали при 100°C . Минеральный состав пылевых частиц снега, согласно данным [3], представлен зольными элементами каа-хемских углей: $\text{O}_{33,2} > \text{Fe}_{19,3} > \text{Si}_{12,3} > \text{Al}_{9,3} > \text{Ca}_{6,9} > \text{Ba}_{3,1} > \text{Mg}_{1,6}, \text{Mn}_{1,6} > \text{S}_{1,0}$ (нижний индекс показывает среднее содержание элемента в %); другие элементы (Na, K, Pb, As, Cd, Cu, Co, Ni, Ti, Zn, Zr, Ag, Bi, W, Ge, Ce, Hg, La, P, $\text{C}_{\text{неорг}}$, S, Cl, N) присутствуют в количествах менее 1%.

Геостатистическая модель загрязнения воздушной атмосферы города создавалась средствами программного обеспечения *Surfer 6.0*; 3D-поверхность загрязнения территории строилась в пространственной системе координат как функция $z = f(x, y)$; где z – среднесуточные содержания пылевых частиц, осевших на единицу поверхности снегового покрова, x и y – широта, долгота местности по показателям GPS.

Карты загрязнений снегового покрова пылевыми частицами строились с применением геоинформационных технологий (ArcGIS 9.3). Картирование полей и зон загрязнений осуществлено интерполированием содержаний пыли в мониторинговых



Рис. 1. Вид на г. Кызыл в зимнее время сверху (снимок <http://glovis.usqs.gov/>)

точках по методу взвешенных расстояний (IDW) [4]. Поля накоплений загрязнений снега пылевыми частицами разбиты на пять уровней по аналогии с рекомендациями руководства [1], используемыми в оценке суммарного загрязнения снежного покрова Z_c : *низкий* (<32); *средний* (32-64); *высокий* (64-128), *очень высокий* (128-256) и *максимально высокий* (>256).

Результаты и обсуждения.

3D-моделирование загрязнения атмосферы

Сравнение усредненных по всем пробам содержаний нерастворимых фракций талого снега из данных мониторинга снежного покрова г. Кызыла в отопительные периоды 2011-2015 гг. свидетельствует об увеличении пылевых выбросов (табл. 1).

Статистическая обработка мониторинговых данных показывает, что в указанное пятилетие тренд пылевого загрязнения снежного покрова города описывался линейной регрессией восходящего типа (1) с расчетным коэффициентом прироста суточных накоплений пылевых частиц $17,67 \text{ мг/м}^2$; достоверность аппроксимации высокая, т.к. коэффициент детерминации R^2 , или доля регрессионной дисперсии в общей дисперсии показателя, превышает 90%:

$$Y = 17,67X - 12,9; R^2 = 0,98, \quad (1)$$

где Y – среднесуточная масса выпавших на снеговой покров пылевых частиц, усредненная по территории города, $\text{мг/м}^2 \cdot \text{сутки}$; X – год проведения мониторинга снежного покрова.

Ежегодное приращение среднесуточных выбросов пылевых частиц в атмосферу г. Кызыла составляет $17,67 \text{ мг/м}^2$, и связано оно, очевидно, с увеличением количества сжигаемого угля как в г. Кызыле, так и в пос. Каа-Хем, примыкающем к городу с наветренной стороны, обусловленным, в основном, ростом численности населения. Согласно сведениям федеральной службы государственной статистики, с 2011 по 2015 год прирост численности населения в г. Кызыле составил 3948 чел. в пос. Каа-Хем – 1508 чел. [5]. В последнее пятилетие на пустынных землях, располагавшихся в правобережной северной, южной и центральной зонах города, выросли целые кварталы деревянных застроек с печным отоплением. В целом подстилающая поверхность города, например за три зимних месяца 2014 г., испытывала нагрузку от сжигания в стационарных источниках ~ 170 тыс. т угля, в их числе на ТЭЦ сожжено угля ~ 90 тыс. т, в котельных предприятий ~ 2 тыс. т, в печах частного сектора ~ 77 тыс. т [2].

Для оценки выбросов пылевых частиц в произвольной точке географической системы смоделировано пространственное изображение уровней загрязнения снега пылевыми выбросами в программе Surfer 6.0; на рис. 2 представлены 3D-модели результирующих поверхностей, построенных по значениям среднесуточных выбросов пылевых частиц, над территорией города ($S \approx 200 \text{ км}^2$) в 2012, 2013 и 2014 гг.

Таблица 1

Загрязнение снежного покрова территории г. Кызыла в 2011-2015 гг.

Год	2011	2012	2013	2014	2015
Количество проб снега	11	40	35	28	20
Усредненные выбросы пылевых частиц снегового покрова, мг/м ² -сутки	8,83	19,53	37,41	62,79	75,56

Расчет параметров поверхности осуществлялся с использованием метода кригинга, kriging («наилучшего» в статистическом смысле линейного несмещенного оценителя), по точным значениям параметра в мониторинговых точках.

Анализ расчетной поверхности загрязнения позволяет выявить локальные участки территории, в которых загрязнения максимальны. Из рис. 2а видно, что в 2012 г. при относительно низкой скорости накопления пыли (в среднем 19,53 мг/м²-сутки) модельная поверхность загрязнения была дискретной, на ней идентифицировались пять участков с максимальными значениями среднесуточных накоплений пыли в снеге на уровне 40-57 мг/м²-сутки. Максимальные загрязнения отмечались в западной части города в районе промышленной зоны (94,40 в.д./51,70 с.ш.; 94,47 в.д./51,71 с.ш.), в восточной части

города – в районе застроенного пустыря (94,52 в.д./51,71 с.ш.; 94,54 в.д./51,70 с.ш.) и поселке Каа-Хем (94,67 в.д./51,68 с.ш.).

В 2013 г., при увеличении величины среднесуточных пылевых выбросов до 37,41 мг/м²-сутки заметен отчетливый подъем результирующей поверхности накопления загрязнений до значения ~120-154 мг/м²-сутки, увеличение темпов пылевых выбросов в западной промышленной зоне, очевидно, связано с функционированием котельных предприятий и расширением жилого сектора, в восточной зоне – возведением более двух сотен новых домов, при этом рост уровня поверхности сопровождался слиянием четырех пиков в единый купол (рис. 2б). В 2014 г. проявились новые обстоятельства:

- 1) в восточных кварталах подъем результирующей поверхности загрязнения продолжился,

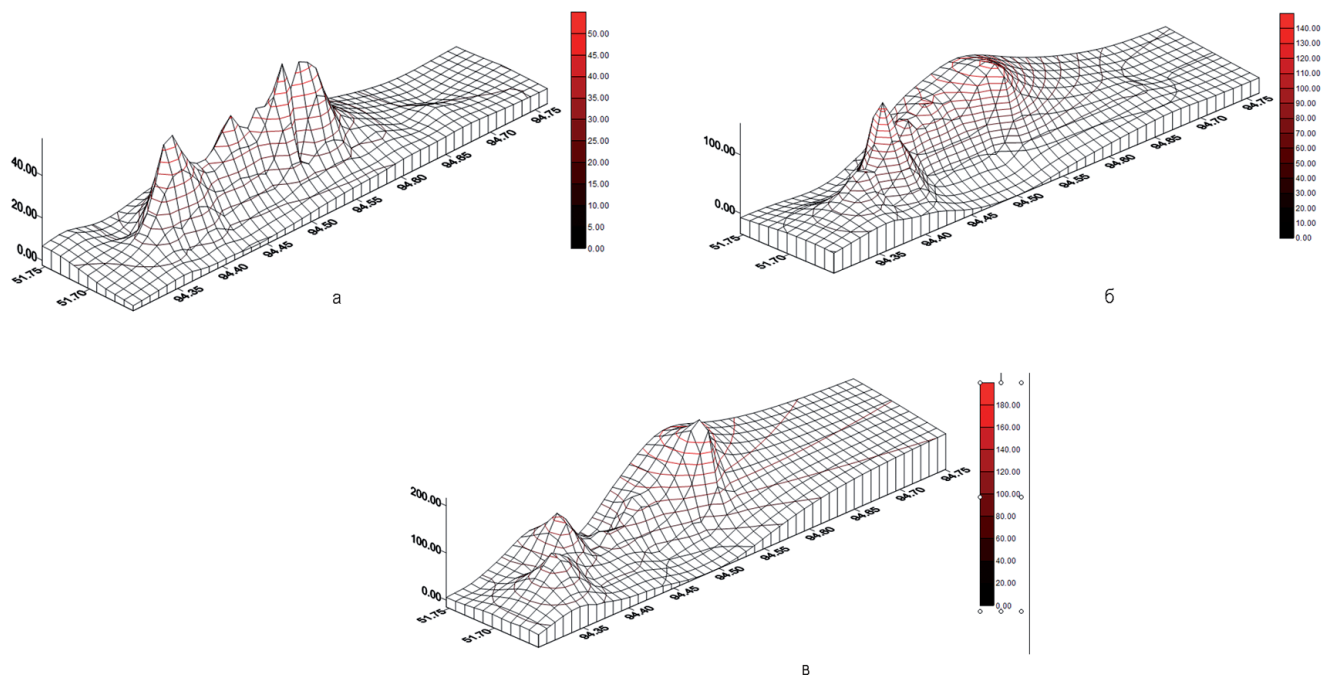


Рис. 2. 3D-модель уровня загрязнения снежного покрова а – 2012 г., б – 2013 г., в – 2014 г.

- среднесуточная скорость накопления пыли увеличилась до $\sim 216 \text{ мг/м}^2\cdot\text{сутки}$ (рис. 2в);
- 2) возникла четкая ступенька, разделяющая западную и восточную части города по меридиану 92,43 в.д. вдоль уже застроенных «старых» кварталов без домов-новостроек;
 - 3) в западном секторе на модельной поверхности правобережной зоны появился новый максимум на уровне $\sim 160 \text{ мг/м}^2\cdot\text{сутки}$, объясняемый активной застройкой района жилыми домами с печным отоплением.

На основании представленных результатов можно утверждать, что в г. Кызыле в отопительные сезоны трехлетнего периода 2012-2014 произошел почти четырехкратный рост выбросов пылевых частиц, в основном за счет увеличения объемов сжигания угольного топлива в домашних печах и котельных предприятий, максимальные значения параметра поверхности загрязнения повышались в пределах $57\text{-}216 \text{ мг/м}^2\cdot\text{сутки}$.

На картосхемах города (рис. 3, 4), вычерченных по мониторинговым данным 2012 и 2014 гг., показано расположение точек отбора проб и распределение полей загрязнения. Видно, что в 2012 г. уровень полей суточного загрязнения снега выбросами пылевых частиц на значительной части территории был низким ($< 32 \text{ мг/м}^2\cdot\text{сутки}$); более высокий *средний* уровень выбросов ($32\text{-}64 \text{ мг/м}^2\cdot\text{сутки}$) фиксировался локально в западной зоне в районе промышленных предприятий с автономными котельными и в восточной зоне в кварталах, расположенных восточнее ТЭЦ

по направлению господствующих восточных ветров. Спустя два года (в 2014 г.) фоновый уровень загрязнения территории города возрос до уровня *средний* ($32\text{-}64 \text{ мг/м}^2\cdot\text{сутки}$); одновременно в правобережной зоне в кварталах, застроенных частными домовладениями, и в левобережной промышленной зоне выбросы пыли повысились с низкого и среднего уровней до *высокого* ($64\text{-}128 \text{ мг/м}^2\cdot\text{сутки}$), а вокруг вновь застроенного пустыря восточнее ТЭЦ уровень загрязнения стал *очень высоким* ($128\text{-}256 \text{ мг/м}^2\cdot\text{сутки}$).

Картирование полей загрязнений и геостатистическое моделирование поверхностей пылевых выбросов свидетельствуют об ухудшении экологии города в 2012-2014 гг. Поскольку технология и объемы сжигания угля на Кызылской ТЭЦ не претерпели изменений, основной причиной роста загрязнения явилось увеличение количества и функционирование источников выбросов загрязнений – домашних печей и автономных котельных предприятий. Хорошим примером может служить точка отбора № 36 на правом берегу реки Енисей. Пять лет назад там было начато активное строительство коттеджного поселка, в 2013-2014 годах он начал заселяться, что привело к значительному увеличению выбросов в атмосферу. Следует также отметить, что в настоящее время в связи с высокими ценами на тепло и горячую воду тенденция перехода малых предприятий на тепло-снабжение от своих котельных продолжается, то же самое происходит и в жилом секторе, все строящиеся особняки отапливаются автономными котлами или печами.

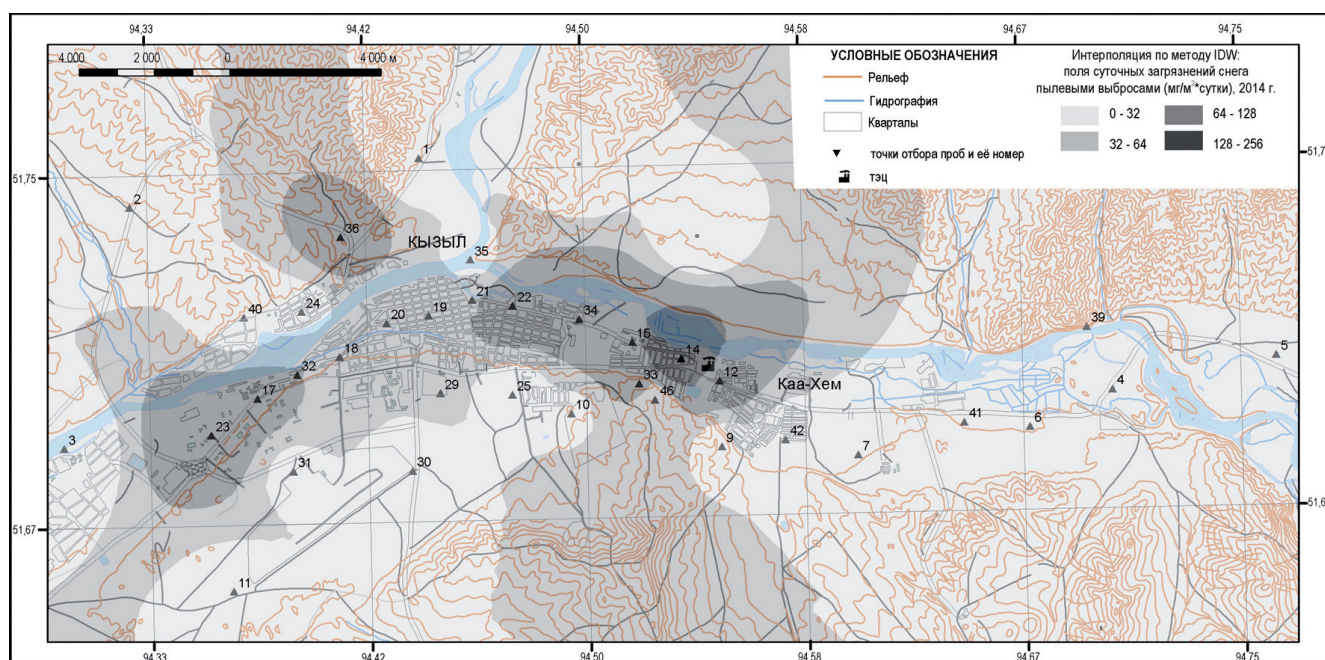


Рис. 3. Карта уровней загрязнения снежного покрова пылевыми частицами в г. Кызыле в 2014 г.

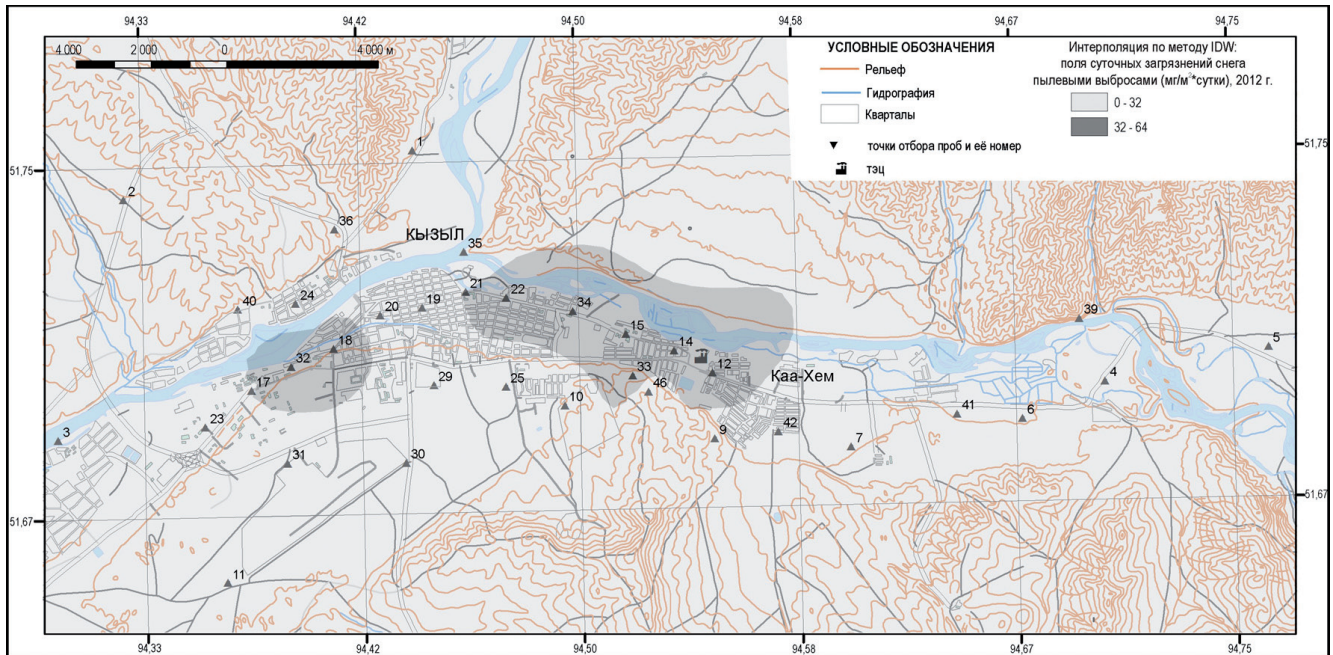


Рис. 4. Карта уровней загрязнения снежного покрова пылевыми частицами в г. Кызыле в 2012 г.

Заключение

На основании данных мониторинга снегового покрова г. Кызыла проведено картирование и построение 3D-модельных поверхностей загрязнения территории по величине среднесуточных выбросов пылевых частиц на единицу площади. Отмечено, что в отопительные сезоны 2012-2014 гг. произошел почти четырехкратный рост выбросов пылевых частиц, в основном за счет увеличения объемов сжигания угольного топлива в домашних печах и котельных предприятий, максимальные значения параметра поверхности по выбросам пылевых загрязнений повышались в пределах $57-216 \text{ мг/м}^2\cdot\text{сутки}$.

Ключевые слова: мониторинг снегового покрова, ГИС-картирование, 3D-моделирование.

ЛИТЕРАТУРА

1. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. – Л. : Гидрометеоздат, 1991. – 693 с.
2. Тас-оол Л.Х., Янчат Н.Н., Жданок А.И., Чупикова С.А. Загрязнение снежного покрова территории г. Кызыл // Геоэкология. Инженерная геология.

Гидрогеология. Геокриология. – 2014. – № 6. – С. 507-517.

3. Тас-оол Л.Х., Хомушку Б.Г., Янчат Н.Н. Мониторинг загрязнения г. Кызыла в отопительный сезон // Региональная экономика: технологии, экономика, экология и инфраструктура : материалы международной научно-практической конференции, посвященной 20-летию ТувИКОПР СО РАН (14-15.10.2015 г., Кызыл, Россия) / отв. ред. докт. экон. наук Г.Ф. Балакина [Электронный ресурс]. – Кызыл : ТувИКОПР СО РАН, 2015. – С. 200-203. – URL: http://ipc-publisher.ru/collections_1.aspx?id_sb=14 (дата обращения 12.11.2015).

4. ArcGIS 9. Geostatistical Analyst. Руководство пользователя. – ESRI, 2001 ; Russian Translation by DATA+. – 278 с.

5. Город Кызыл // Города России [Электронный ресурс]. – URL: http://города-россия.рф/sity_id.php?id=146 (дата обращения 22.05.2016) ; Кaa-Хем [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%B0-%D0%A5%D0%B5%D0%BC> (дата обращения 22.05.2016).