

# Теоретическое и экспериментальное исследование процесса таяния снежного покрова в районе г. Омска по материалам 2007-2008 гг.

А.В. Дмитриев, В.В. Дмитриев

*Омский государственный педагогический университет*

*644099, Омск, Тухачевского, 14*

*E-mail: [vdmitriev@omgpu.omsk.edu](mailto:vdmitriev@omgpu.omsk.edu)*

Работа посвящена исследованию временной и пространственной динамики процесса таяния снега вокруг промышленного центра (г. Омск) по материалам зимне - весеннего сезона 2008 года. Было рассмотрено влияние пылевых и сажевых загрязнений на характеристики процесса снеготаяния (дата начала и скорость снеготаяния). Использовались данные дистанционного зондирования (радиометр MODIS) и данные натурных измерений на местности. Работа является продолжением ранее начатых исследований и включает задачу проверки устойчивости зависимостей отмеченных в предыдущих работах. В данной работе более детально рассматривалось влияние размеров частиц загрязнений на процесс снеготаяния. Также проводилась оценка теплового баланса снеготаяния 2007-2008 годов для более корректного учёта влияния разных источников тепловой энергии. Кроме того, для учёта накопления аэрозолей за зимний период использовалась модель ОНД 86.

**Ключевые слова:** снег, снеготаяние, пылевое загрязнение, тепловой баланс.

## Введение

Динамика снеготаяния является индикатором, как климатических процессов, так и зон промышленного загрязнения пылевыми и сажевыми выбросами. В предыдущих работах [1] была отмечена зависимость характеристик снеготаяния от наличия заметного загрязнения, накопленного за зимний период. Кроме того, была прослежена количественная связь зависимости динамики снеготаяния от метеорологических условий. Данная работа проводилась с целью проверки устойчивости наблюдавшихся зависимостей, учёта дополнительных действующих факторов так как конечной целью являлась разработка пригодного для произвольного года алгоритма выделения зон аэрозольных загрязнений и оценки их величины. В работе использованы данные ДЗЗ, полученные радиометром MODIS спутника TERRA и AVHRR со спутников NOAA за зимне-весенний сезон 2008 г.

По результатам аналогичных исследований предыдущего года были получены следующие результаты:

1) Для количественного описания процесса таяния оказалось удобным аппроксимировать временную зависимость альbedo снежного покрова с помощью аппроксимирующей кривой на основе фильтра Баттерворта [2].

2) На загрязнённых участках ход снеготаяния был более резким, что выразилось, в более высоком значении коэффициента  $D$ , а само таяние начиналось раньше.

3) Контур вытаивания согласовался с преимущественным направлением ветра в зимний период и с альbedo снега на момент начала снеготаяния.

На первом этапе исследовалось реальное распределение примесей в снегу, для чего были выбраны контрольные точки, в которых производился отбор проб снега. Методика взятия проб и дальнейшего определения количества загрязняющих веществ была аналогична использованной в предыдущих работах [1]. По результатам прошлых лет были определены направления, по которым происходит основной ветровой вынос аэрозолей промышленного происхождения. С целью повышения точности наземных измерений, в текущем году использовалось большее количество точек для взятия наземных проб снега и сами точки были перераспределены по окрестностям города.

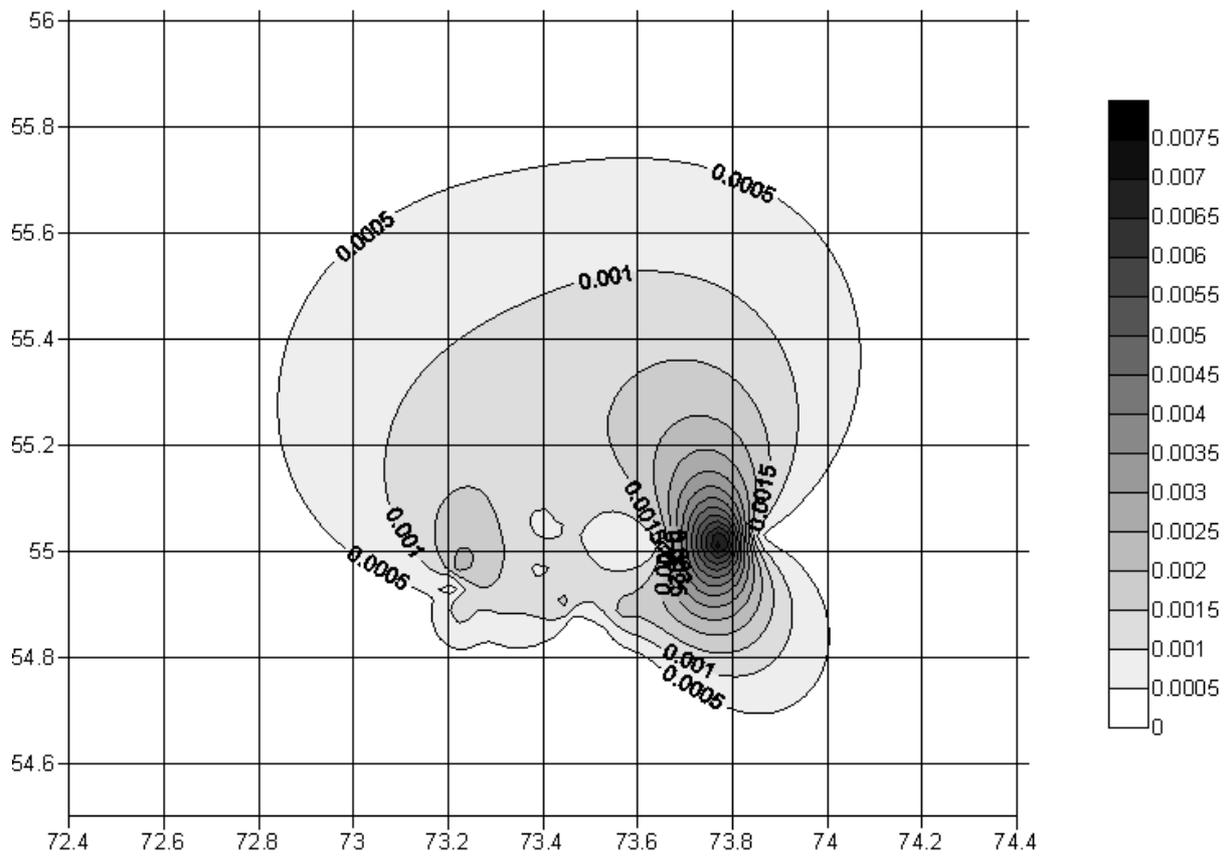


Рис. 1. Контуры распределения содержания загрязняющих веществ в районе г. Омска

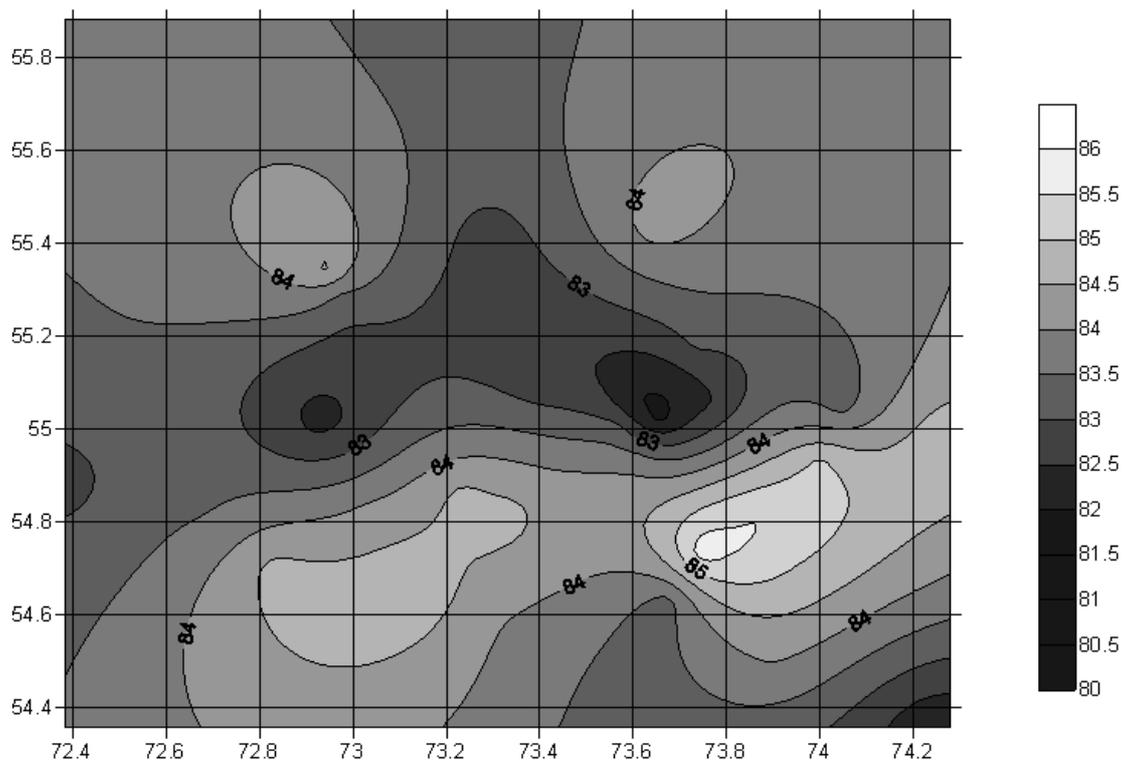


Рис. 2а. Схема контуров, отображающих дату активного снеготаяния. Для удобства обработки и отображения даты приведены в виде номера дня в году

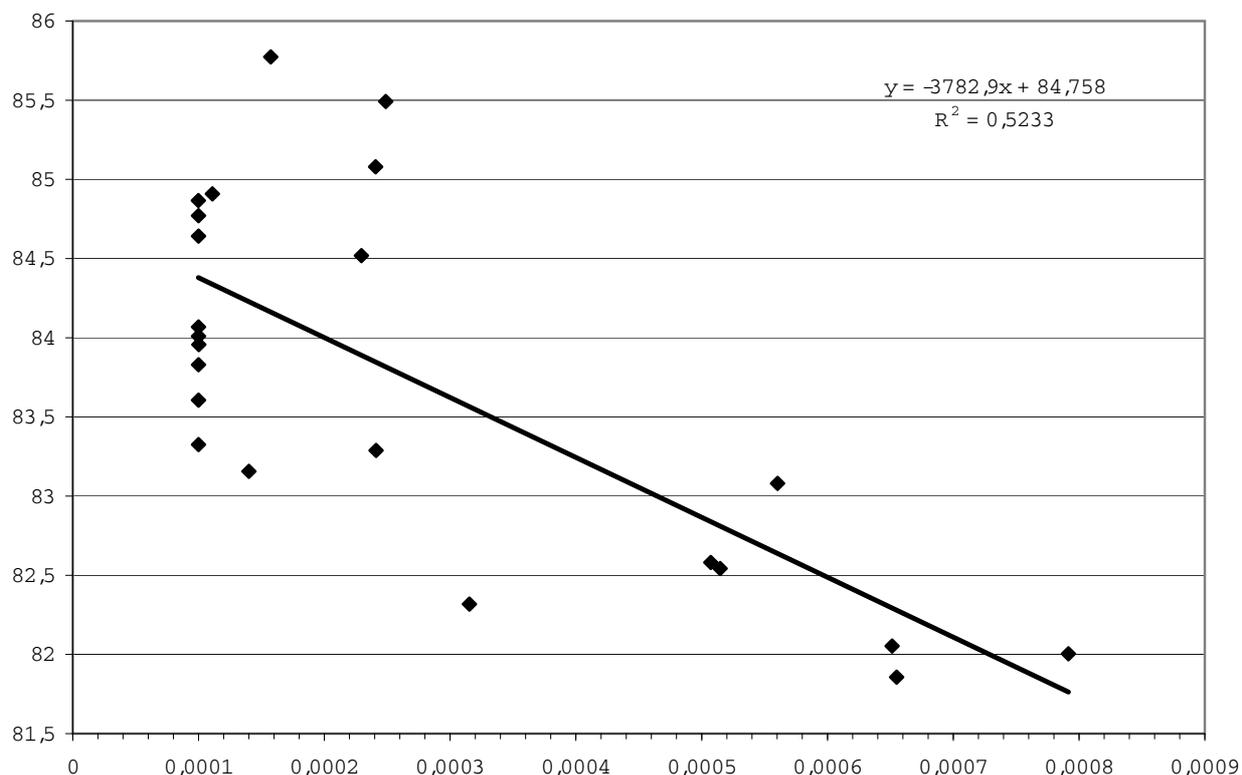


Рис. 26. Зависимость даты активного снеготаяния от величины загрязнения на 2008 г.

Для получения равномерного покрытия исследуемой территории точечные данные были аппроксимированы на район вокруг г. Омска. Результаты данной аппроксимации приведены на рис. 1. На рисунке хорошо заметны две основные зоны выпадения аэрозолей, которые соответствуют двум основным источникам промышленного загрязнения. Это крупнейшая в регионе ТЭЦ-5, на рис. 1 ей отвечает правый и самый интенсивный пик концентрации загрязнений. Вторым источником является нефтеперерабатывающий завод, на рис. 1 ему отвечает левый, менее выраженный пик.

На втором этапе, аналогично прошлому году, был прослежен процесс таяния снежного покрова по снимкам радиометра MODIS (продукт MOD09). В качестве примера, на рис. 2 приведены контуры, соответствующие дате наиболее активного снеготаяния и соответствующая им зависимость даты от содержания примесей. Сравнение рис. 1 и 2а показывает их хорошее совпадение, а именно, весьма отчетливо проявились две основных зоны загрязнений. Отмечается также соответствие между величиной загрязнения и датой опережающего норму начала снеготаяния. В целом, результаты 2008 года частично подтвердили вывод 3, в том, что касается даты начала таяния. Анализ рис. 2б позволяет сделать вывод, что при малых количествах примесей заметен значительный разброс данных. Это вполне объяснимо, так как при малом количестве примесей становится более заметным влияние на процесс снеготаяния других факторов, которые естественно отличались на разных участках. В правом нижнем углу рисунка отчетливо проявилась волна нормального (с климатической точки зрения) снеготаяния, которая весной 2008 года пришла к нам с юго-востока из Казахстана.

Зависимость интенсивности снеготаяния от содержания загрязняющих веществ в текущем году достоверно не выявлена, по причине отличий в тепловом балансе снежного покрова в 2007 и 2008 годах, в том числе, различия в темпах прироста температуры и притока солнечной радиации. Более подробно эти различия рассмотрены далее.

Анализ экспериментальных данных и физический смысл показывают, что основным фактором, определяющим пространственное распределение загрязнений, является их ветровой перенос. Поэтому следующий этап работы заключался в теоретическом описании процесса ветропереноса.

Качественная оценка направлений переноса загрязнений возможна с использованием розы ветров. Направление зимних ветров в Омском регионе обладает достаточным постоянством, в качестве примера на рис 3 показаны розы ветров за 2 года. Как было показано в работе [1], направление контуров вытаивания соответствует направлению зимних ветров. Это можно также пронаблюдать, сравнив рис. 3 и рис. 2а.

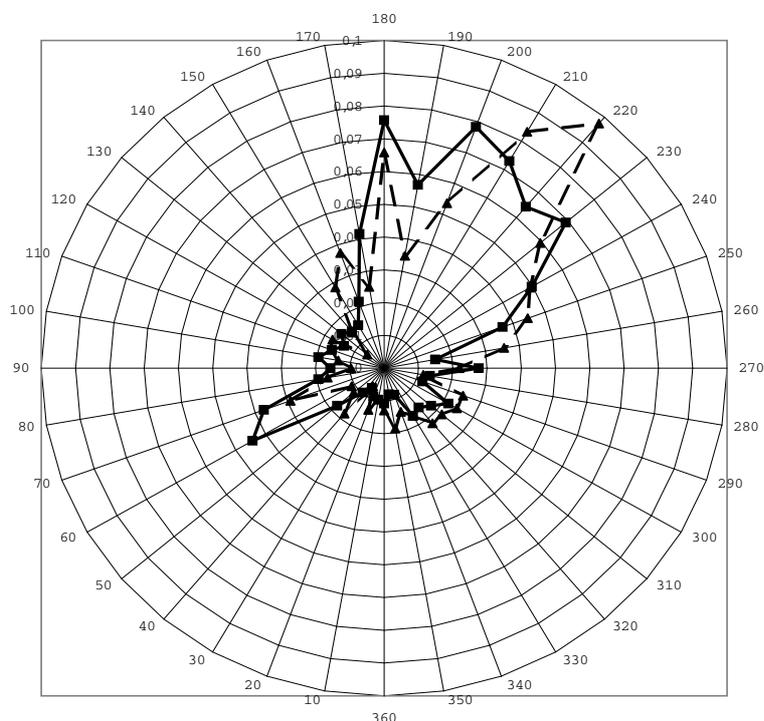


Рис. 3. Розы ветров за зимние периоды 2007 (пунктирная линия) и 2008 (сплошная линия) годов

дней) позволили наиболее ярко проявиться влиянию аэрозольных загрязнений. Сравнение теории и эксперимента позволяет сделать вывод об их качественном и количественном совпадении.

Для количественной оценки разноса загрязнений был использован алгоритм ОНД-86 [3]. Возможность применимости данного алгоритма в данной задаче показывает рис. 4. На данном рисунке (рис. 4а) приведены результаты теоретического расчёта пространственного распределения выбросов с учётом конкретных характеристик ТЭЦ 5 г. Омска. Более тёмным цветом на рисунке показаны области более высокой концентрации аэрозольной компоненты в воздухе. По осям отложены расстояния в метрах. Для сравнения приведены также подневные контуры вытаивания с 12 по 17 апреля 2003 г. (рис 4б) Выбор весны 2003 года был обусловлен тем, что условия таяния и наблюдения (большое количество ясной погоды, то есть, солнечных

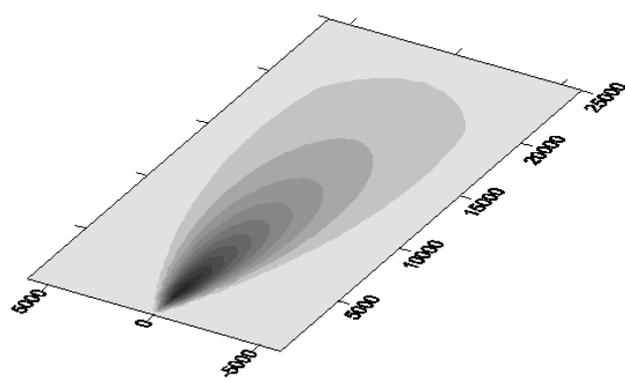


Рис. 4а. Графическое представление расчётов по разносу ветром выбросов от ТЭЦ5 в направлении преимущественных ветров

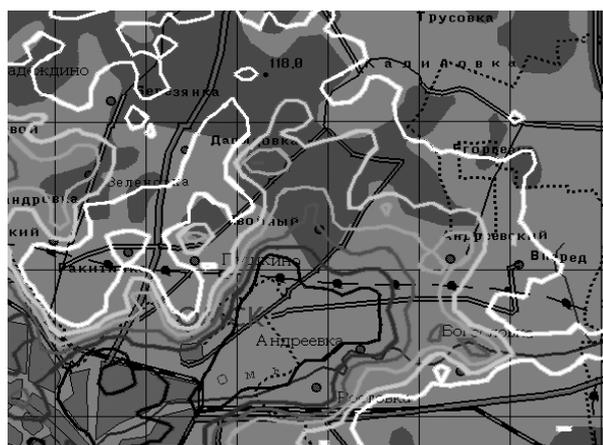


Рис. 4б. Контуры вытаивания за последовательные дни апреля 2003 года. ТЭЦ5 находится в основании треугольного контура красного цвета

Дальнейшим приближением к реальной ситуации являлось использование алгоритма ОНД86 для случая двух точечных (ТЭЦ5 и нефтезавод) и распределённого фонового (город) источников



Рис. 5. Контуры отложения аэрозольных выбросов в окрестностях г. Омска, рассчитанные с использованием ОНД86

загрязнения. На рис. 5 представлены результаты теоретического расчёта пространственного распределения концентрации примесей в снежной толще для зимы 2008 года с учётом направления ветров, которые соответствуют пространственному распределению концентрации осаждённых аэрозолей, полученному наземными измерениями (см. рис. 1). В расчетах, результаты которых приведены на данном рисунке, использованы характеристики конкретных источников загрязнений (высота и диаметр труб, скорость истечения газовой смеси и т.д.).

Так как в данном (2008) году не проявилась зависимость скорости снеготаяния от величины загрязнения, была предпринята попытка поиска другого признака, характеризующего загрязнение. Обратило на себя внимание поведение альбедо в течение зимы, то есть, до начала снеготаяния, в среднем оно сохраняет постоянное

значение с незначительным положительным трендом, но в отдельные дни альбедо существенно отклоняется от среднего. Поскольку в течение зимы температурный фон отрицательный, то таяние снежного покрова определяется, в основном, приходом энергии от солнца. Поэтому, отклонение от среднего за зиму значения альбедо характеризует способность снежной толщи поглощать излучение. А поглощательная способность существенно зависит от примесей. На рис. 6 приведена зависимость разброса зимних значений альбедо от величины загрязнения. Таким образом, данный параметр тоже может служить критерием количества загрязнения в снегу.

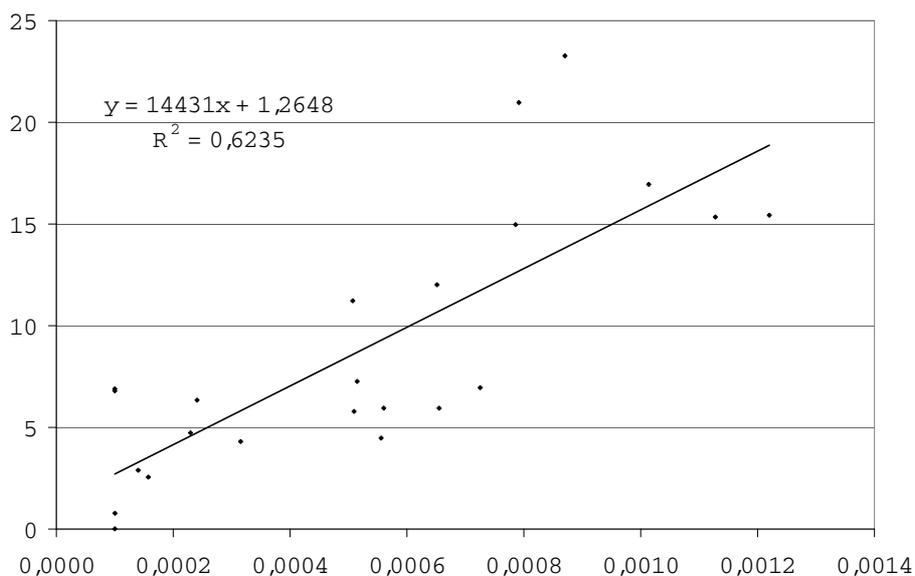
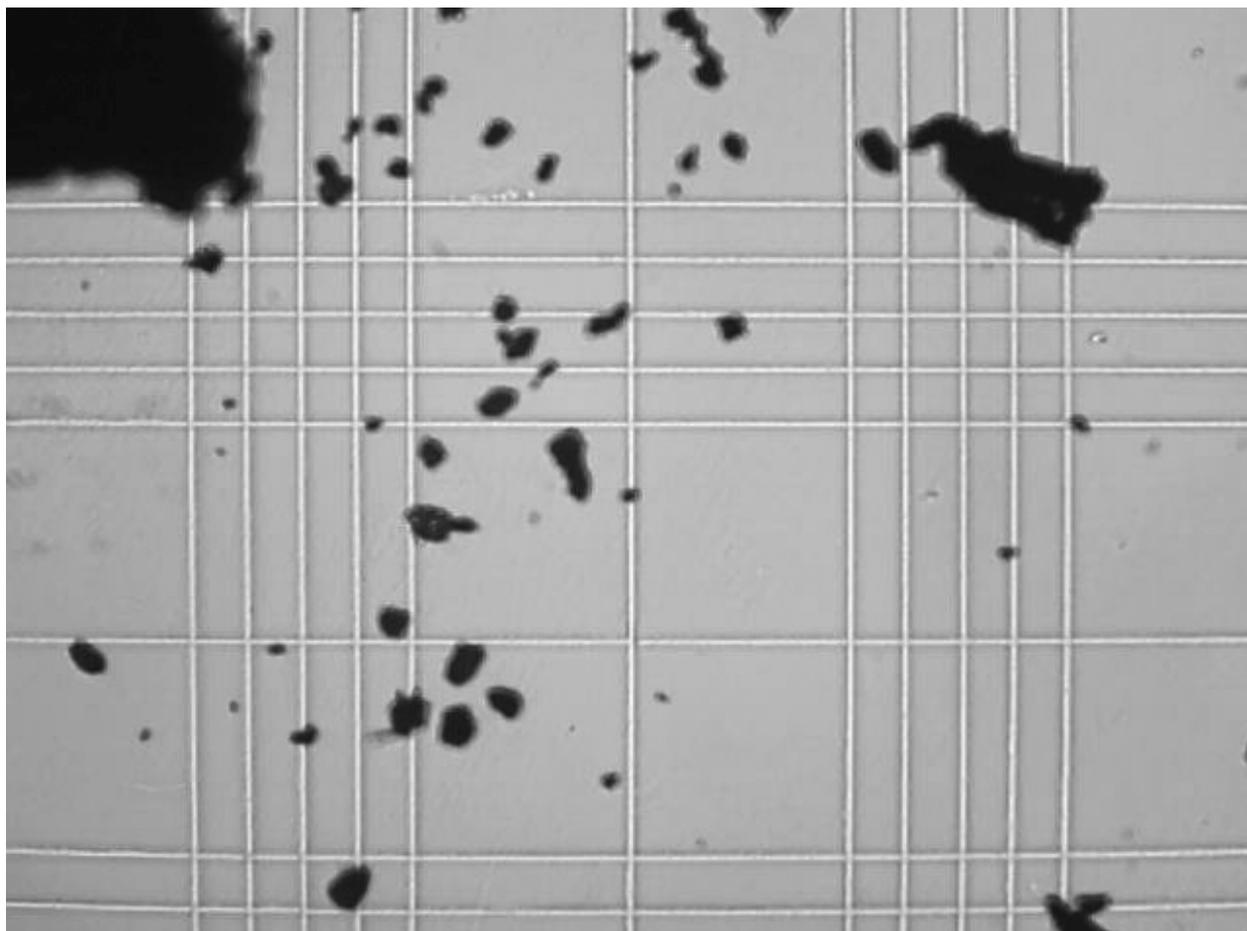


Рис. 6. Зависимость разброса зимних значений альбедо снежного покрова от концентрации загрязнений

Для исследования влияния размеров частиц загрязнений на процесс снеготаяния определения была собрана лабораторная установка, состоящая из окулярной камеры DCT-35 с USB – интерфейсом, микроскопа «Биолам», системы крепления и компьютера. Масштаб изображения определялся при помощи камеры Горяева, обычно используемой в микробиологии. На рис. 7 приведено полученное при помощи установки изображение частиц и камеры Горяева. Размер маленького квадрата камеры составляет 0.05 мм, а крупного квадрата – 0,2 мм. Согласно Госту размер выдержан с точностью 0.5%. Для целей данного исследования погрешность является пренебрежимо малой, так как составляет менее 1 пикселя на изображении. Размер самого изображения составляет 640\*480 пикселей, линейный размер составляет 0.8\*1.2 мм. Масштаб изображения составил 1,78 мкм/пиксел.



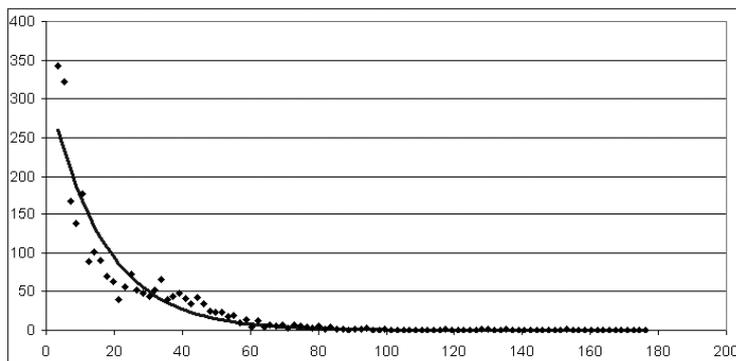
*Рис. 7. Типичная картина одиночного снимка, получаемого камерой*

При экспериментальном исследовании определялось распределение частиц по размерам для имевшихся образцов.

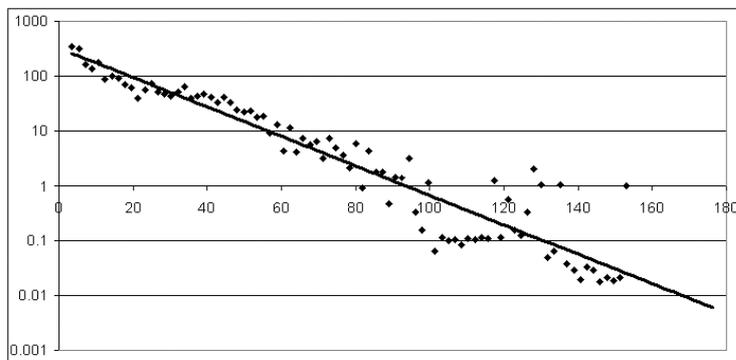
Ввиду достаточно малого поля зрения микроскопа для каждого образца делалась серия из 20 снимков в различных частях рассеянного по предметному стеклу образца. Размер частиц и занимаемая ими площадь измерялись с помощью алгоритма гранулометрии, представляющего из себя сравнение изображения после последовательных операций размывания с увеличивающимся на каждом шаге размером примитива [2].  $f \circ b = (f \div b) + b$  где « $\div$ » обозначена логическая операция эрозии изображения, «+» - операция дилатации и « $\circ$ » - операция размывания.

На рис 8 приведены 2 варианта отображения типичного распределения частиц образца по размерам. На рис. 8а используется линейная шкала, лучше отображающая общий вид распределения. На рис. 8б используется логарифмическая шкала, при помощи такого

изображения легче отслеживать наличие крупных частиц. В качестве приближающей функции использовалось естественное для такого случая экспоненциальное распределение вида  $N=a*\exp(b*r)$ , где  $r$  – радиус частиц,  $a$  и  $b$  – параметры распределения. С использованием полученного распределения оказалось возможным вычислить характеристики частиц: средний размер, величину средней и общей площади и т. д. Например, для приведённого на рис 8 случая



**а**



**б**

Рис. 8а. Вид точечного графика распределения частиц по размерам (линейная шкала по оси Y)

Рис. 8б. Вид точечного графика распределения частиц по размерам (логарифмическая шкала по оси Y)

ными методами, на рис. 2 были приведены контуры вытаявания снега весной 2008 г. в окрестностях г. Омска.

Из сравнения рисунков видно их весьма хорошее соответствие. На всех трёх изображениях отмечаются 2 основных ареала максимумов поглощения, примесей и даты раннего снеготаяния соответственно.

Для более корректного учёта влияния разных источников тепловой энергии проводилась оценка теплового баланса снеготаяния 2007-2008 годов

Оценка производилась из следующего выражения:  $Q_m = Q_{sn} + Q_{ln} + Q_h + Q_e + Q_g + Q_p - dU/dt$  [5], где  $Q_m$  – поток тепла, затрачиваемого на таяние,  $Q_{sn}$  – баланс коротковолновой радиации,  $Q_{ln}$  – баланс длинноволновой радиации,  $Q_h$  – турбулентный поток тепла из воздуха к границе снежного покрова,  $Q_e$  – поток тепла фазовых переходов,  $Q_g$  – поток тепла через границу снег-грунт,  $Q_p$  – тепло, приносимое дождём.  $dU/dt$  – скорость изменения внутренней энергии на единицу площади снега.

Из числа рассматриваемых составляющих  $Q_e$ ,  $Q_g$ , и  $dU/dt$  были приблизительно равны для 2-х рассмотренных сезонов.

В таблице приводится сравнение оценочных значений составляющих теплового баланса

средний размер составляет 20,57 мкм или, с учётом точности измерений, около 21 мкм.

В дальнейшем полученные данные были использованы для теоретического расчета коэффициента поглощения света снегом. Расчёт поглощённой в толще снега солнечной энергии осуществлялся на основании закона Бугера [4]. Коэффициент поглощения среды определялся по

$$\text{формуле: } \chi = \frac{Nk_a \pi D^2}{4},$$

где  $k_a$  – вычисленное по теории Ми сечение поглощения частицы,  $N$  – число частиц,  $D$  диаметр частицы.

В наших расчётах использовалось приближение среднего диаметра.

На рис 9 приведено графическое отображение результатов расчёта поглощения солнечной энергии в снегу. Ранее на рис. 1 было приведено распределение загрязнения, полученное назем-

Таблица 1. Оценочные значения составляющих теплового баланса

	2007	2008
$Q_{sp}$ , Дж/м <sup>2</sup> *сут	9463464	10793874
$Q_{ln}$ , Дж/м <sup>2</sup> *сут	-1780145	-4768195.2
$Q_p$ , Дж/м <sup>2</sup> (единовременно)	9240000	

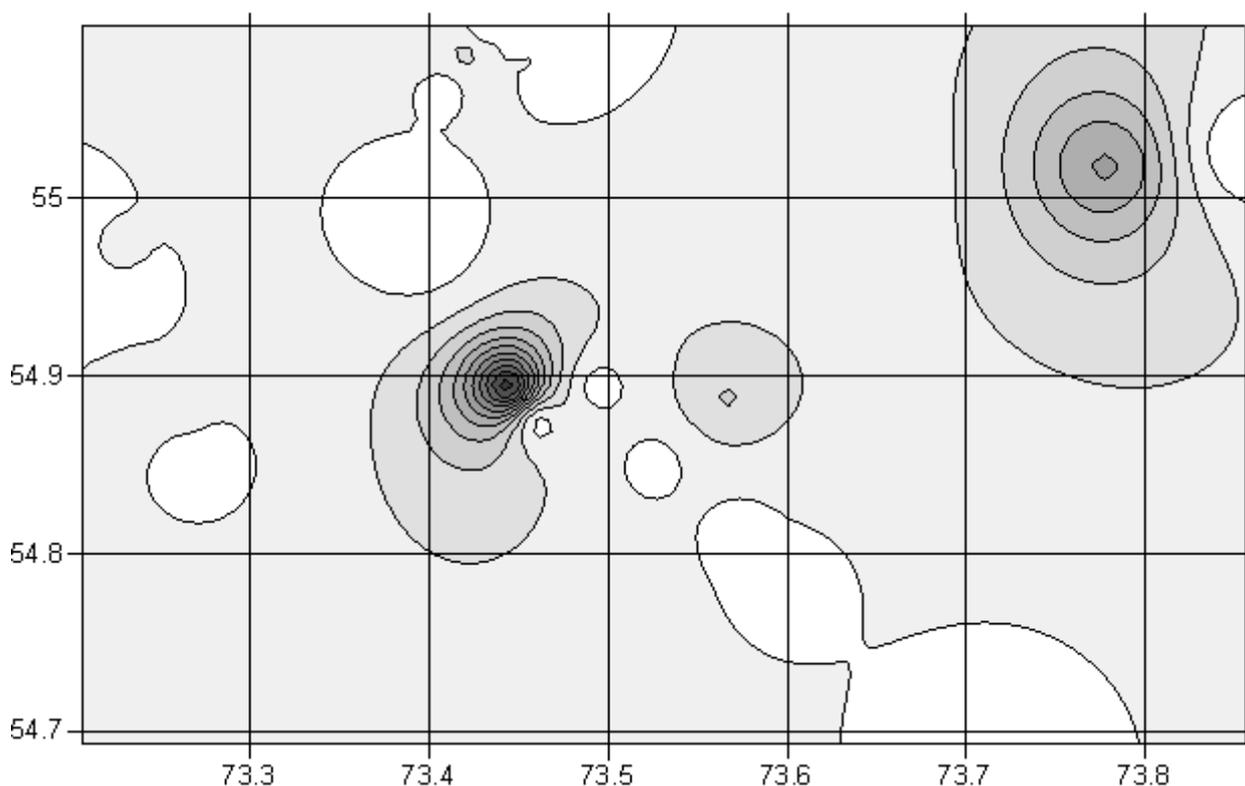


Рис. 9. Пространственное распределение теоретически рассчитанного коэффициента поглощения

Определить точное значение  $Q_h$  для рассматриваемых годов достаточно сложно, возможно было только указать превышение этого потока в 2007 г.

По полученным данным видно превышение прихода тепла от солнца в 2008 году.

В целом по данной работе следует сделать следующие выводы. Первое, выбор показателей, способных количественно охарактеризовать пространственное распределение загрязнений, переносимых ветром будет зависеть от конкретных климатических условий весеннего сезона. Второе, для оценки влияния различных тепловых источников на процесс снеготаяния необходимо использовать теплофизическую модель снежного покрова. Третье: для наиболее отчетливого выявления пространственного распределения загрязнений следует выбирать весенние сезоны с большим количеством солнечной радиации.

Авторы благодарят лабораторию Информационной поддержки космического мониторинга ИКИ РАН за предоставление архива спутниковых данных.

## Литература

1. Дмитриев А.В., Дмитриев В.В. Корреляция динамики снеготаяния и содержания пылевых веществ в снегу вокруг г. Омска // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды,

потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научн. статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2008. Вып. 5. Т. I. С. 84-92.

2. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005.

3. Методика расчета концентрации в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий ОНД86. Госкомгидромет, 1986.

4. Красс М.С., Мерзликин В.Г. Радиационная теплофизика снега и льда. Л.: Гидрометеиздат, 1990.

5. Снег: справочник / Под ред. Д.М. Грея. Л.: Гидрометеиздат, 1986.

## **Theoretical and experimental research of snow melting process around Omsk city on materials of 2007-2008**

**A.V. Dmitriev, V.V. Dmitriev**

*Omsk State Pedagogical University  
644099, Tukhachevskogo, 14, Omsk  
E-mail: [vdmitriev@omgpu.omsk.edu](mailto:vdmitriev@omgpu.omsk.edu)*

This article deals with research of temporal and spatial snow thawing dynamics around industrial object (Omsk city) on materials of 2008 yr winter-spring seasons. Influence of dust and smoke pollution on snow thawing parameters (starting date and thawing speed) was investigated. The satellite images of MODIS radiometer and ground measurement results were used in work. This article is a development of a previous researches and has included additional goal of checking stability of dependence, detected in previous article. This article also includes a more detailed view at influence of particle size to snow thawing process. An approximation of snow thawing thermal balance for 2007-2008 was also made to distinguish different sources of energy more correctly. The OND 86 wind dispersion model was used to approximate aerosol accumulation in snow during winter season.

**Keywords:** snow, snow thawing, dust-aerosol pollution, thermal balance.