

# **Теоретическое и экспериментальное исследование процесса таяния снежного покрова в районе г. Омска по материалам 2008-2009 г.**

**А.В. Дмитриев, В.В. Дмитриев**

*Омский государственный педагогический университет  
644099, Омск, Тухачевского 14, E-mail: vdmitriev@omgpu.omsk.edu*

Работа посвящена исследованию временной и пространственной динамики процесса таяния снега вокруг промышленного центра (г. Омск) по материалам зимнее – весеннего сезона 2009 года. Была произведена автоматическая аппроксимация временной зависимости яркости снежного покрова для определение основных параметров процесса снеготаяния. 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 и частиц загрязнений на процесс снеготаяния. Также проводилась оценка теплового баланса снеготаяния 2009 года 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, анализ временных рядов.

## **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 зависимость динамики снеготаяния от метеорологических условий. Данная работа проводилась с целью исследовать влияние индустриальных загрязнений на процесс снеготаяния с точки зрения создания алгоритма для восстановления параметров загрязнений по спутниковым данным (MOD09). В работе использованы данные ДЗЗ, полученные радиометром MODIS спутника TERRA и AVHRR со спутников NOAA за зимне-весенний сезон 2008 г.

По ходу выполнения работы ставились следующие задачи.

1. Создать алгоритм, позволяющий в автоматическом режиме определять дату и характеристики снеготаяния с использованием стандартных продуктов (MOD09 ежедневные).
2. Исследовать наземными методами пространственное распределение и характеристики пылевых и сажевых загрязнений в окрестностях г. Омск на «момент» снеготаяния.
3. Исследовать взаимосвязь пространственной и временной динамики снеготаяния с характеристиками загрязнений. Выявить основные действующие факторы.
4. Исследовать гранулометрических характеристик пылевых и сажевых частиц, входящих в состав загрязнений.
5. Смоделировать тепловой баланс, управляющий процессом таяния снежного покрова. Определить основные его компоненты, определяющие дату и скорость снеготаяния.

По результатам аналогичных исследований предыдущего года были получены следующие результаты:

**Первое.** Для количественного описания процесса таяния оказалось удобным аппроксимировать временную зависимость альбедо снежного покрова с помощью аппроксимирующей кривой на основе фильтра Баттервортса [2].

**Второе.** На загрязненных участках ход снеготаяния был более резким, что выражалось, в более высоком значении коэффициента D, а само таяние начиналось раньше.

**Третье.** Контур вытаивания согласовался с преимущественным направлением ветра в зимний период и с альбедо 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 дополнена по сравнению с предыдущим годом с целью определения плотности примесей. 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 (108) количество точек для взятия наземных проб снега и сами точки были равномерно распределены по окрестностям города.

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

На втором этапе, аналогично прошлому году, был прослежен процесс таяния снежного покрова по снимкам радиометра MODIS (продукт MOD09). В прошлом году ход яркости снега в период снеготаяния аппроксимировался на основе средней яркости тестового участка. В этом году было решено перейти к использованию хода яркости каждого пикселя в последовательности изображений периода снеготаяния. Ожидаемое количество расчетов потребовало автоматизации расчетов. Для каждой точки подбирались коэффициенты уравнения, приближающего временной ход яркости.

Для наилучшего понимания приведём вид ФНЧ Баттервортса и основные коэффициенты в уравнении на рис 2.

В применении к ходу яркости поверхности в период снеготаяния основные коэффициенты имеют смысл:

- А – яркость поверхности после схода снега
- В – разность яркостей до и после снеготаяния
- С – дата наиболее активного снеготаяния

Д – крутизна временной зависимости кривой яркости, которая определяет скорость снеготаяния

Блок-схема основной части алгоритма приведена на рис 3. Подбор коэффициентов уравнения осуществлялся методом градиентного спуска [3]. Данный метод был выбран из-за того, что при относительной простоте и физической очевидности он обеспечивал однозначность приближения.

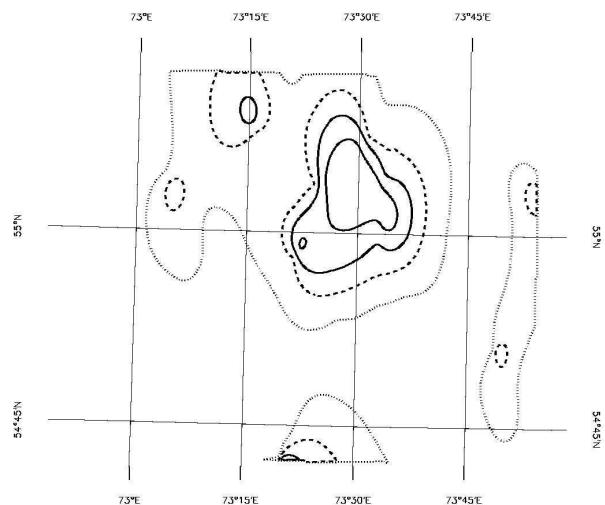


Рис. 1а. Контуры распределения содержания загрязняющих веществ в районе г. Омска по данным наземных измерений

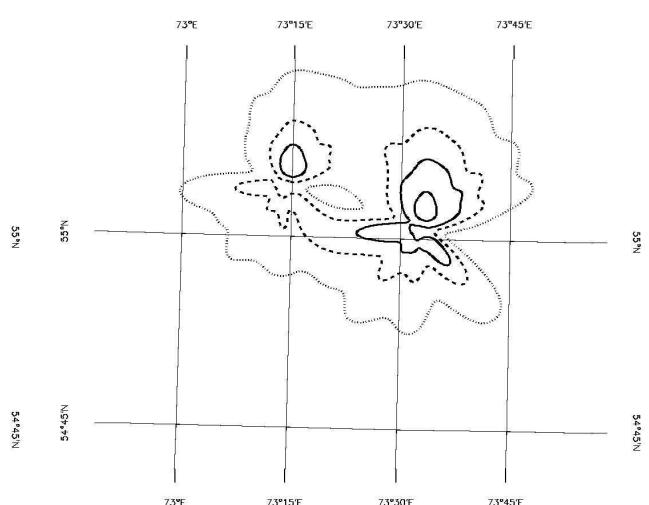


Рис. 1б. Расчётные контуры распределения содержания загрязняющих веществ в районе г. Омска по ОНД86

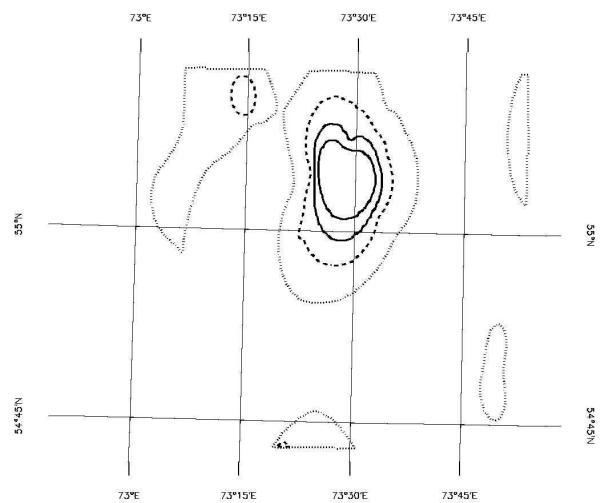


Рис. 1в. Контуры распределения средней плотности пылевых загрязняющих веществ по данным наземных измерений

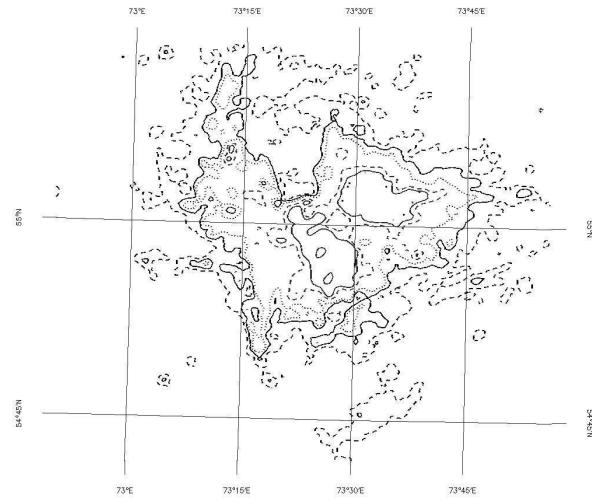


Рис. 1г. Контуры дат активной фазы таяния снега в районе г. Омска

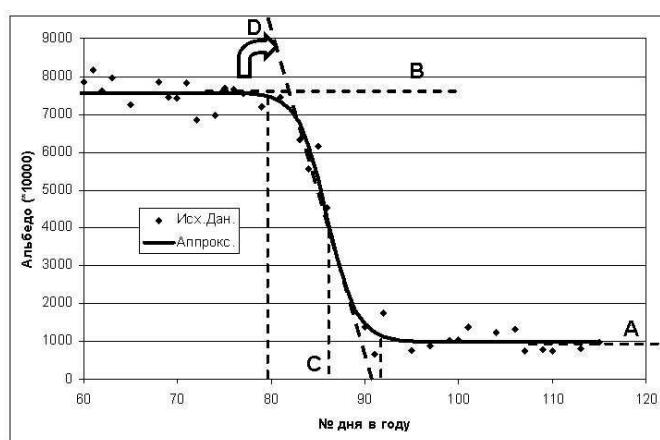


Рис. 2. Схема основных параметров уравнения Баттервортта

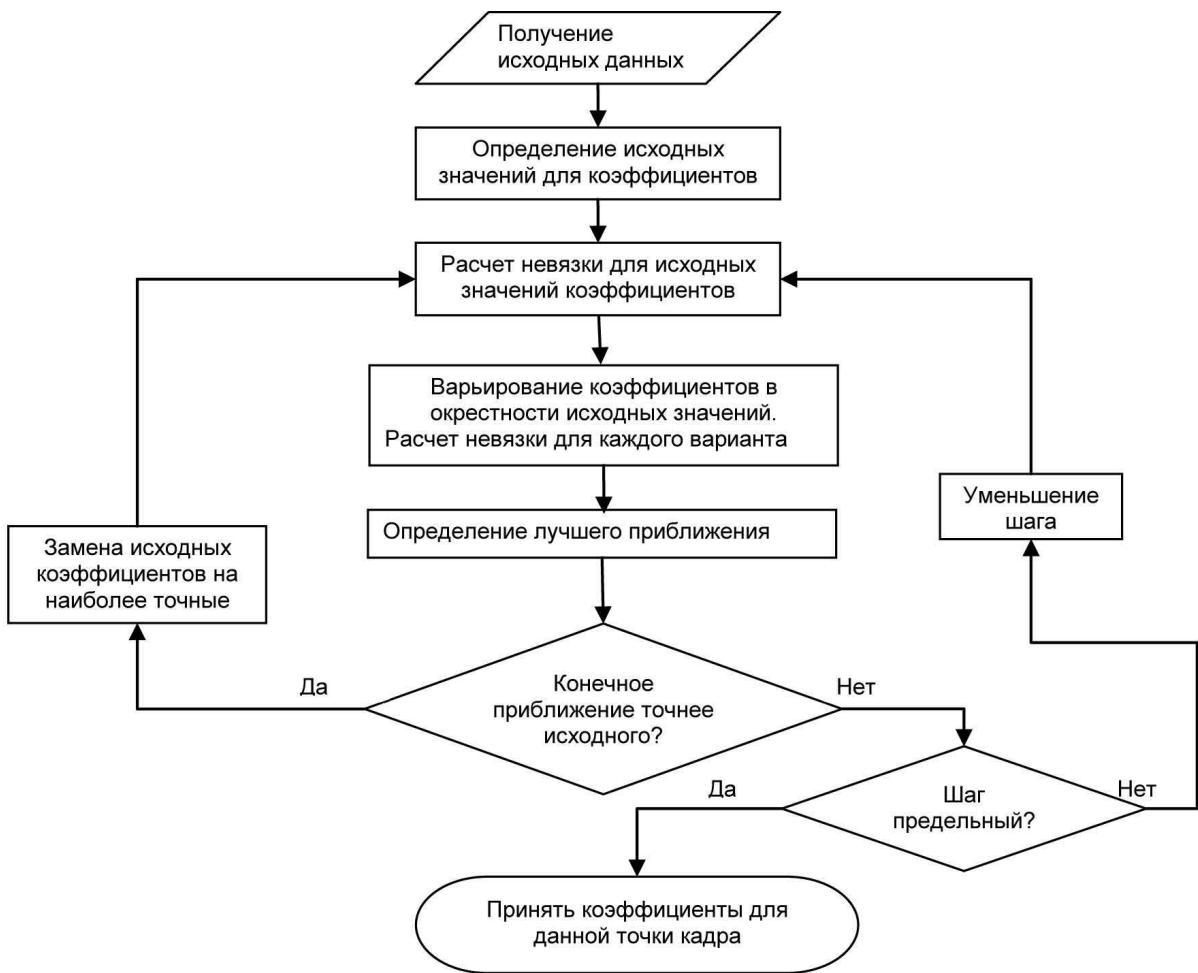


Рис. 3. Блок-схема расчётной части алгоритма автоматизированного вычисления параметров снеготаяния

В ходе обработки последовательности спутниковых изображений за период снеготаяния применённым алгоритмом были получены изображения, соответствующие пространственному распределению коэффициентов уравнения. Кроме того, в виде изображения выводилась оценка надёжности приближения по методу среднеквадратичной разности. В качестве оценки надёжности данных оказалось удобным использовать коэффициент корреляции регрессионного выражения, который вычислялся стандартным способом. Полученные для коэффициентов С, D и R изображения приведены на рис. 4, 5 и 6 соответственно. По полученному распределению коэффициента С контуры дат активного снеготаяния можно получить в автоматическом режиме.

Кроме того, данная методика позволила проследить дату активного снеготаяния на участках, частично покрытых лесом и в районе населённых пунктов. При использовании снежного индекса на участках поверхности, покрытых лесом, приходится корректировать пороговые значения индекса под тип местности. Так как данная способ реагирует на временной ход характеристики, а не на текущее значение, то устойчивость к смене типа местности повышается. Действительно, по рис. видно, что коэффициенты уравнения с достаточно высокой надёжностью (более 0,8) определяются для практически всей местности, при этом от вида местности зависят, в основном, коэффициенты А и В, а коэффициенты С и D, отражающие временной ход от типа покрытия практически не зависят.

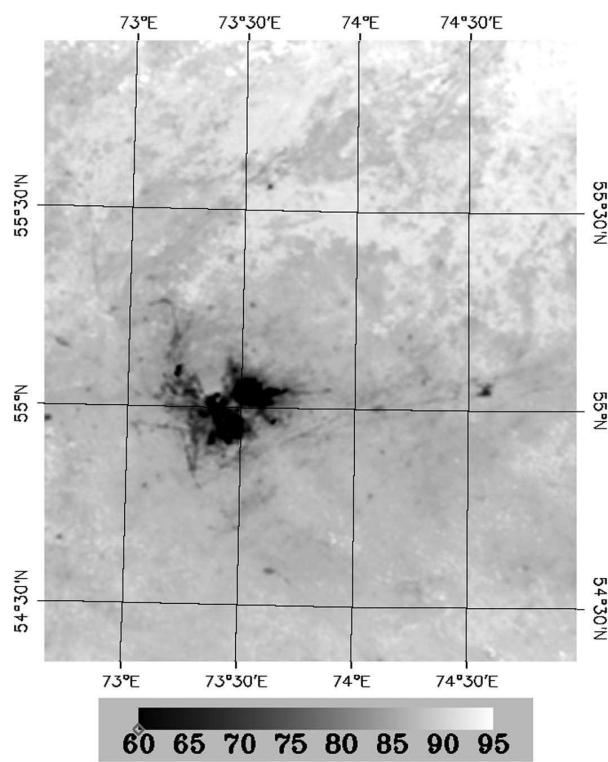


Рис. 4. Пространственное распределение компоненты «С» (день активного снеготаяния)

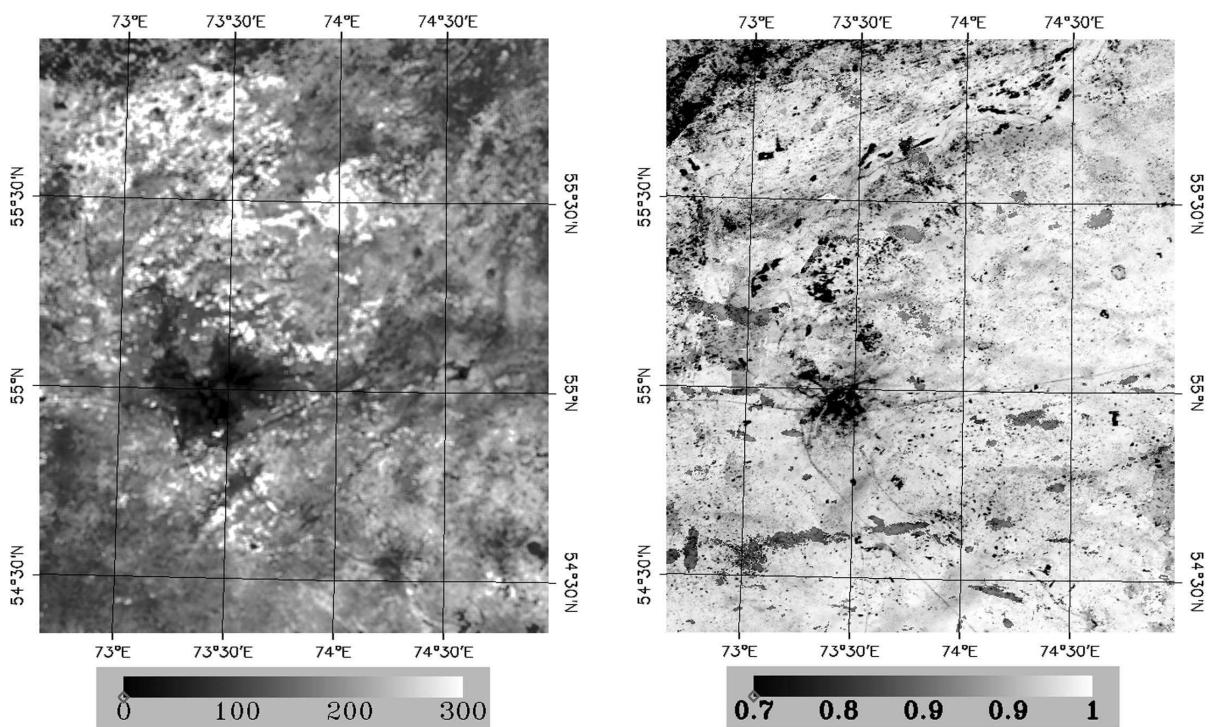


Рис. 5. Пространственное распределение компоненты «D» (крутизна кривой яркости в период снеготаяния)

Рис. 6. Пространственное распределение коэффициента корреляции приближения с исходными данными

Для сравнения, на рис 7 приведены рассчитанные по полученным коэффициентам графики хода яркости различных видов участков (открытое поле(2), лес(2) и населённые пункты(2)) одного района в период снеготаяния. Видно, что хотя начальные значения яркости значительно отличаются, изменение яркости, связанное с процессом снеготаяния имеет схожий вид. Заметно отличаются графики, соответствующие населённым пунктам – снижение яркости снега начинается заметно раньше (приблизительно на 20 дней), но идёт медленнее, и в результате заканчивается позже приблизительно на неделю. На рис 8 показан ход яркости на лесных участках с различной долей проекционного покрытия. Видно, что при различии исходных значений, динамика имеет схожий вид. Таким образом, один и тот же алгоритм может быть применён для оценки снеготаяния в различных лесных массивах, отличающихся степенью сомкнутости крон.

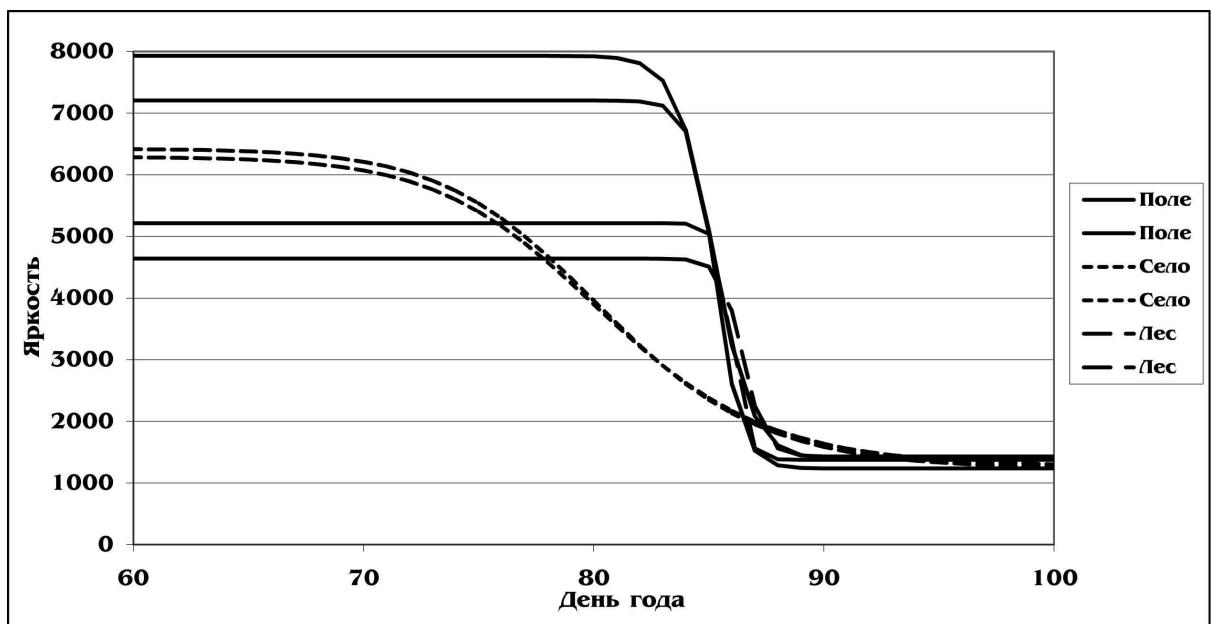


Рис. 7. Графики хода яркости различных видов участков в период снеготаяния

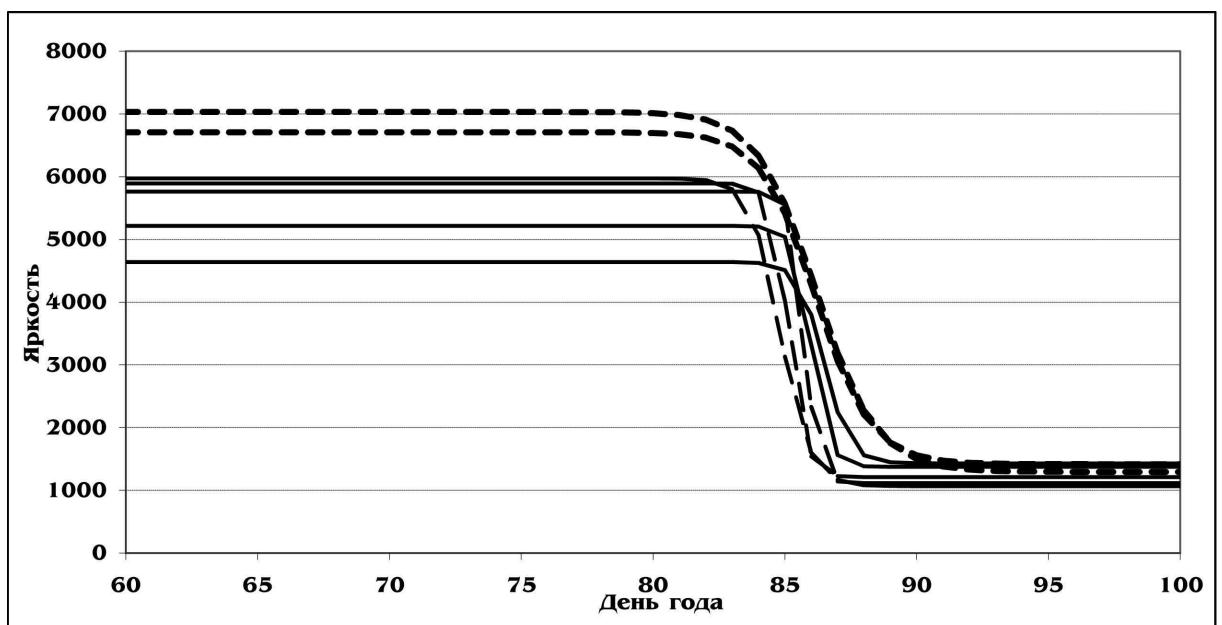


Рис. 8. Графики хода яркости лесных участков с различной сомкнутостью крон в период снеготаяния

Для диагностирования аэрозольного загрязнения снега преимущественно использовался день активного снеготаяния, представленный показателем С. По соответствующему изображению были построены контура вытаивания, соответствующие последовательным дням. На рис. 1г приведены наземные данные и значения дня снеготаяния. Видно, что контура вытаивания схожи по форме и расположению с распределением пыли по наземным данным.

Далее была сделана попытка вычислить зависимость между днём таяния и содержанием примесей на материале всей совокупности исследованных точек. Внешний вид распределения показал, что вся совокупность точек неоднородна, заметны несколько групп, с достаточно четкой зависимостью дня таяния и содержания пылевых частиц. Вид зависимости в каждой группе оказался схожим, но не идентичным. При проверке географического положения этих групп выяснилось, что точки каждой из них расположены приблизительно в однотипных участках выборки. Предположительно различия во взаимосвязи величин каждой группы связаны с разницей типа покрытия и различием углов наклона местности в месте расположения соответствующей группы. Для каждой группы были составлены зависимости даты снеготаяния и концентрации пыли. На рис 9 приведена зависимость корреляции с днём таяния в пределах группы и содержания пыли. Видно, что аналогично результатам 2008г, 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.

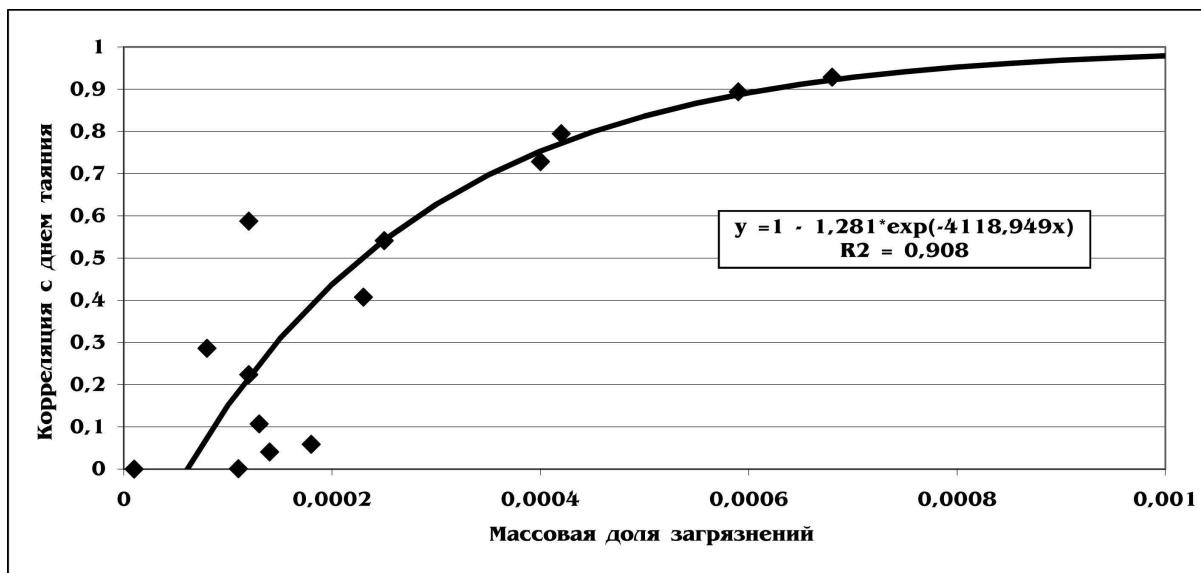


Рис. 9. Зависимость корреляции с днём таяния в пределах группы и содержания пыли

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[1], направление контуров вытаивания приблизительно соответствует направлению зимних ветров.

Для количественной оценки разноса загрязнений был использован алгоритм ОНД-86 [4] для случая двух точечных (ТЭЦ5 и нефтезавод) и распределённого фонового (город) источников загрязнения. На рис 1б представлены результаты теоретического расчёта пространственного распределения концентрации примесей в снежной толще для зимы 2009 года с учётом направления ветров.

При экспериментальном исследовании определялось распределение частиц по размерам для имеющихся образцов с использованием установки, описанной в работе [1]. Прошлогодняя методика была дополнена следующим образом в каждую ёмкость с образцом закладывалось объектное стекло известной массы для возможности последующего определения средней плотности частиц. Массы ёмкостей, образцов и объектных стёкол определялись с помощью электронных весов, имеющих точность  $10^{-4}$  г.

Ввиду достаточно малого поля зрения микроскопа для каждого образца делалась серия из 30 снимков в различных частях рассеянного по предметному стеклу образца. Размер частиц и занимаемая ими площадь измерялись с помощью алгоритма гранулометрии, описанного в [1].

На рис 10 приведены 2 варианта отображения типичного распределения частиц образца по размерам. На рис 10 слева используется линейная шкала, лучше отображающая общий вид распределения, справа используется логарифмическая шкала, лучше подходящая для отслеживания крупных частиц. В качестве приближающей функции использовалось естественное для такого случая экспоненциальное распределение вида  $N=a \cdot \exp(b \cdot r)$ , где  $r$  – радиус частиц, а  $a$  и  $b$  – параметры распределения. С использованием полученного распределения оказалось возможным вычислить характеристики частиц: средний размер, величину средней и общей площади и т д.

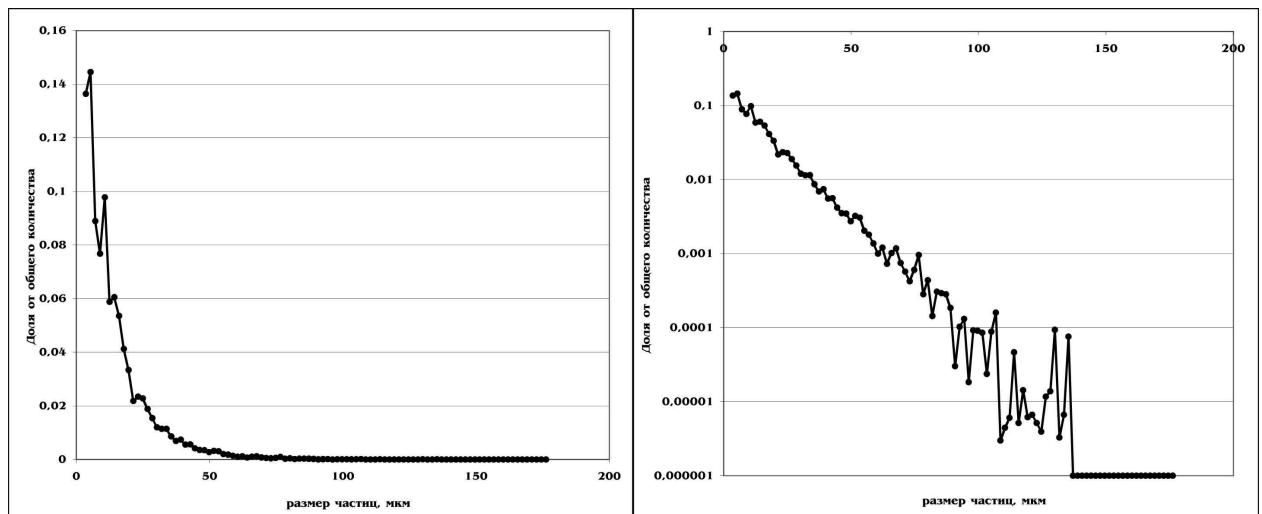


Рис. 10. Типичного распределение частиц образца по размерам, слева – линейная шкала, справа - логарифмическая

В дополнение к данным прошлого года, по измеренной массе и вычисленному объёму также определялась плотность пылевых частиц образца. Распределение средней плотности частиц пыли приведено на рис 1в. Видно, что это распределение больше соответствует рассчитанному по онд86 ветровому разносу, чем контуры вытаивания снега.

Для более корректного учёта влияния разных источников тепловой энергии проводилась оценка теплового баланса снеготаяния 2009 годов.

Оценка производилась из следующего выражения:  $Qm = Qsn + Qli + Qle + Qln2 + Qh + Qe + Qg + Qp - dU/dt$  [5], где  $Qm$  – поток тепла, затрачиваемого на таяние,  $Qsn$  – баланс коротковолновой радиации,  $Qln$  – баланс длинноволновой радиации,  $Qe$  – турбулентный поток обмена тепла между воздухом и снежным покровом [6],  $Qg$  – поток тепла через границу снег-грунт,  $Qp$  – тепло, приносимое дождём.  $dU/dt$  – скорость изменения внутренней энергии на единицу площади снега. При рассчёте баланса коротковолновой солнечной радиации ( $Qsn$ ) учитывалось рассеяние от облаков соответственно методике [7]. Примерная схема теплообмена приведена на рис 11.

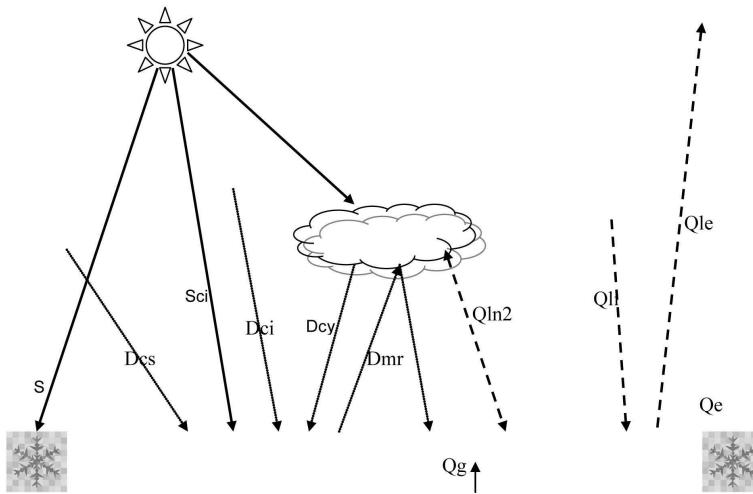


Рис. 11. Примерный вид использовавшейся модели теплообмена

В таблице 1 приводится сравнение значений составляющих теплового баланса за период снеготаяния для горизонтального открытого участка окрестностей г Омска.

Таблица 1. Оценочные значения составляющих теплового баланса

	Основные элементы	Значение, МДж/м <sup>2</sup>
D	Солнечное	226,379574
Qli	Из атмосферы в снег	564,214278
Qle	Из снега в атмосферу	-234,016156
Qln2	Обмен с облаками	-290,726481
Qe	Турбулентный обмен	-196,050181
Qg	Теплообмен с почвой	Не учтена
S	Компоненты коротковолновые	
Sci	Прямое	202,473733
Dcs	Через перистые	48,3757867
Dci	Рассеянное атмосферой	84,3088333
Dcy	Рассеянное перистыми	25,0006933
Dmr	Рассеянное плотными	86,5266667
	Переотраженное	41,107554

В текущем году основной вклад вносился прямой солнечной радиацией, длинноволновой суммарный теплообмен снега с атмосферой и облаками был близок к нулю. Значительную долю тепла унёс турбулентный обмен с атмосферой, за счёт сложившихся благоприятных для испарения снега условий.

На рис 12 в качестве примера произведённых расчётов для конкретного участка г Омска приведены временные зависимости яркости снега и суточного теплового баланса. Видно, что превышение нуля в тепловом балансе соответствует снижению альбедо снег-

ного покрова в 1 канале. Такое сочетание факторов свидетельствует об оттепели. Основное таяние снежного покрова начинается с момента, когда суточный тепловой баланс устойчиво переходит в положительную область.

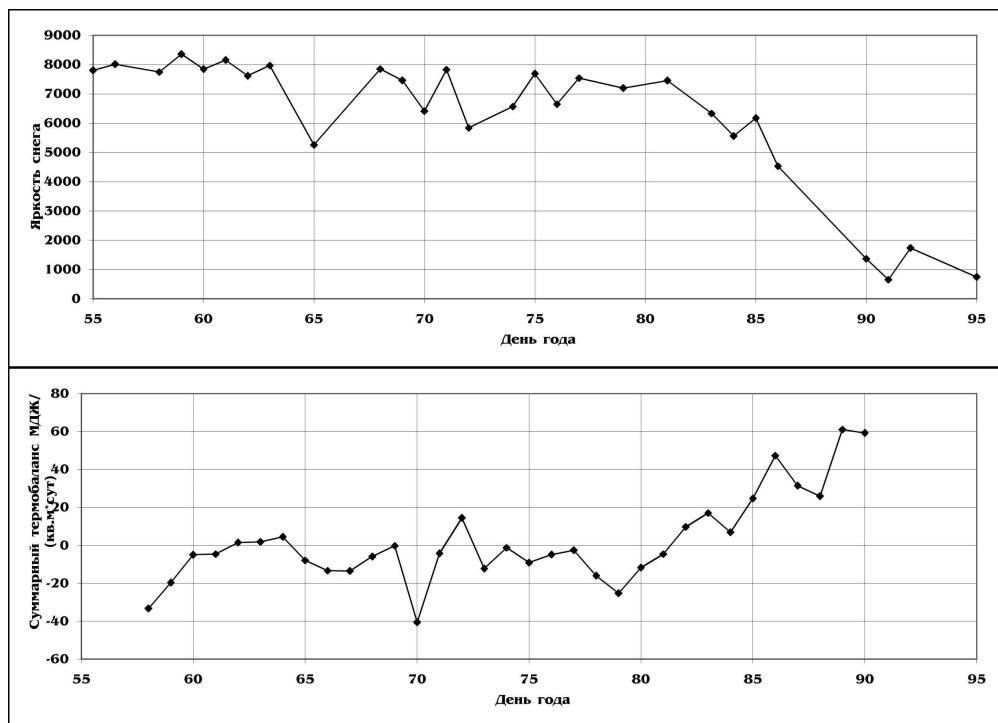


Рис. 12. Временные зависимости яркости снега и суточного теплового баланса

#### Основные результаты.

- Предложенная аппроксимация временной зависимости яркости снежного покрова позволяет в автоматическом режиме определять основные параметры процесса снеготаяния.
- Данный метод позволяет прослеживать ход снеготаяния на частично покрытых лесом участках вне зависимости от степени сомкнутости кроны и на территории малых населённых пунктов.
- Наблюдается корреляция даты снеготаяния и содержания пыли на однородных участках местности. Само значение коэффициента корреляции сильно зависит от величины загрязнения. При массовой доле загрязнений выше 0.0004 коэффициент корреляции устойчиво выше 0.8. При меньших концентрациях сказываются дополнительные факторы (наклон местности, тип покрытия и т. д.), что приводит к уменьшению коэффициента корреляции в среднем до 0.3.
- Пространственное распределение загрязнений, рассчитанное по ОНД86 лучше согласуется с распределением средней плотности примесей, чем с массовой долей примесей в снегу. По нашему мнению, причина этого в физике процесса оседания пыли, которое описывается законом Стокса[6].
- По результатам текущей работы подтверждается сделанный в предыдущей работе вывод, что для наиболее отчетливого выявления пространственного распределения загрязнений следует выбирать весенние сезоны с большим количеством солнечной радиации.

6. Мониторинг временной динамики снеготаяния позволяет определить величину загрязнения при учете климатических факторов и гранулометрии снежного покрова

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

## Литература

1. Дмитриев А.В., Дмитриев В.В. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса таяния снежного покрова в районе г Омска по материалам 2007-2008г. //Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. Сборник научных статей. М.Ж ООО «Азбука-2000», 2009. выпуск 6. Т. 1. С. 113-121.
2. Р. Гонсалес Цифровая обработка изображений – Москва, Техносфера 2005
3. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. Бронштейн И. Н., Семеняев К. А. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981.
4. Методика расчета концентрации в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий ОНД86 Госкомгидромет 1986
5. Снег справочник / под ред Д.М. Грея – Ленинград: Гидрометеоиздат 1986.
6. Алексеевский Н. И. Гидрофизика: учебник для студ. Вузов – М.: Издательский центр «Академия»б 2006.
7. P.W. Suckling, J.E. Hay A cloud layer-sunshine model for estimating direct, diffuse and total solar radiation // Atmosphere, V. 15 № 4 1977, Canadian Meteorological and Oceanographic Society p. 194-207.

## **Teoretical and experimental research of snow melting process around Omsk city on materials of 2008-2009**

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

*Omsk State Pedagogical University.  
644099, Tuchachevskogo, 14, Omsk , E-mail: vdmmitriev@omgpu.omsk.edu*

This article deals with research of temporal and spatial snow thawing dynamics around industrial object (Omsk city) on materials of 2009 yr winter-spring seasons. Automated approximation of temporal snow brightness dynamics was made to compute necessary snow melting parameters. 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, temporal analysis.