

Мониторинг крупных промышленных центров юга Западной Сибири с использованием данных MODIS и наземных наблюдений

А.А. Лагутин¹, И.А. Суторихин², В.В. Синицин¹, А.П. Жуков¹, И.А. Шмаков^{1*}

¹Алтайский государственный университет
656015, г. Барнаул, пр. Ленина, 61

²Институт водных и экологических проблем СО РАН
656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1

Поступила в редакцию 22.10.2010 г.

Изложены подходы и вычислительные технологии, используемые в центре космического мониторинга Алтайского госуниверситета при восстановлении в мониторинговом режиме по данным MODIS/Terra–Aqua характеристик подстилающей поверхности (альbedo, нормализованного индекса снега NDSI), установлении пространственной структуры зоны техногенного загрязнения крупного промышленного центра, при оценке аэрозольного замутнения атмосферы. Представлены зоны техногенного загрязнения гг. Новосибирск, Кемерово, Томск, Барнаул, Заринск, установленные по данным MODIS в зимний период 2008–2010 гг., демонстрируются примеры распределения аэрозольной оптической толщи в этих зонах. Показано, что восстановленные с использованием продуктов MOD35, MOD09, MOD10 и данных по альbedo зоны загрязнения снежного покрова согласуются с результатами наземных наблюдений.

Ключевые слова: Сибирский регион, промышленные центры, зона загрязнения, MODIS, характеристики подстилающей поверхности, аэрозоль, спутниковые технологии; Siberian region, industrial centers, pollution area, MODIS, land surface parameters, aerosol, satellite technologies.

Введение

Изучение характера воздействия крупного промышленного центра на население, природную среду, погоду и климат является одним из важных направлений исследований по физике региональных природно-климатических изменений [1]. В результате хозяйственной деятельности и мероприятий по жизнеобеспечению человека в атмосферу выбрасывается большое количество энергии – процесс, известный в англоязычной литературе как «human energy production» [2], происходит загрязнение атмосферы и подстилающей поверхности (ПП) аэрозолем, изменяются структура подстилающей поверхности в зоне расположения центра и характер ее использования (см., например, [3]).

Сегодня установлено, что загрязнение снежного покрова сажей в зимний период приводит к уменьшению альbedo ПП и, следовательно, к нагреванию поверхности, изменению режима снеготаяния и локальной погоды [2]. Характер влияния тропосферного аэрозоля на погоду и климат региона является более сложным.

Аэрозольное замутнение атмосферы влияет на атмосферные процессы посредством трех механизмов, которые могут приводить как к охлаждению системы «атмосфера + ПП», так и к ее нагреванию (см. обзоры [4–7] и библиографию в них). Так, например, первый механизм радиационного возмущающего воздействия аэрозоля – прямой радиационный форсинг – связан с рассеянием или поглощением солнечного излучения аэрозолем. Рассеяние коротковолнового излучения аэрозолем приводит к увеличению доли солнечной радиации, покидающей систему, и, как следствие, к охлаждению системы. Поглощение света аэрозольными комплексами изменяет скорость нагрева атмосферы, что, в свою очередь, может приводить к изменению процессов циркуляции в атмосфере.

Второй механизм воздействия аэрозоля на климат реализуется посредством изменения микрофизических характеристик облаков. Повышение концентрации аэрозоля приводит к увеличению числа капель в облаках и уменьшению их среднего размера, что увеличивает альbedo облаков. Следствием такого воздействия аэрозоля являются повышение влагозапаса облаков, увеличение времени их жизни и изменение пространственно-временной структуры осадков. Аэрозоли влияют также на химические процессы в атмосфере, изменяя концентрацию климатообразующих газовых компонентов (третий механизм).

* Анатолий Алексеевич Лагутин (lagutin@theory.asu.ru); Игорь Анатольевич Суторихин (sia@iver.asu.ru); Владимир Владимирович Синицин (svv@space.asu.ru); Андрей Петрович Жуков (zhukov@theory.asu.ru); Иван Александрович Шмаков (ivan@theory.asu.ru).

Понятно, что уточнение знаний о динамике поведения региональной климатической системы в зоне расположения крупных промышленных центров, вычленение и оценка основных факторов — естественных и антропогенных, определяющих ее современное состояние, а также прогнозирование характеристик системы на различные сроки в настоящее время возможны лишь при использовании результатов моделирования в рамках региональных климатических моделей. Однако для старта этих моделей требуются данные по «критическим» параметрам системы с необходимым пространственным и временным разрешением. Особую важность имеют данные, позволяющие уточнять используемые в моделях параметризации при описании воздействия того или иного антропогенного фактора и связей между различными элементами региональной климатической системы.

Научным сообществом в начале 90-х гг. было установлено, что основным источником требуемых для моделирования данных должна быть информация приборов, вынесенных на космические платформы (см. обсуждение этой проблемы в [4, 8]). С выводом на орбиту в рамках программы EOS/NASA 36-канального спектрорадиометра MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) на борту космических платформ Terra/Aqua [9–11] и представленной возможностью принимать в режиме реального времени данные этого прибора был открыт новый этап исследований характеристик системы «атмосфера + подстилающая поверхность Земли» из космоса, характера воздействия крупных промышленных центров региона на население, природную среду, погоду и климат.

Пространственная структура зоны техногенного загрязнения, аэрозольное загрязнение атмосферы и подстилающей поверхности, распределение температуры и водяного пара, двунаправленный коэффициент спектральной яркости (ДКСЯ) и альbedo ПП, вегетационный индекс NDVI, содержание CO и метана в атмосфере — ключевые характеристики в проблеме анализа воздействия крупных промышленных центров на региональную погоду и климат — сегодня измеряются приборами спутников Terra/Aqua с необходимым пространственным и временным разрешением (см., например, [12, 13]).

В данной статье рассматриваются подходы и вычислительные технологии, используемые в центре космического мониторинга Алтайского государственного университета при восстановлении в мониторинговом режиме по данным MODIS/Terra–Aqua характеристик ПП (альbedo, нормализованного индекса снега NDSI), установлении пространственной структуры зоны техногенного загрязнения крупного промышленного центра, при оценке аэрозольного замутнения атмосферы. Представлены зоны техногенного загрязнения гг. Новосибирск, Кемерово, Томск, Барнаул, Заринск, установленные по данным MODIS в зимний период, демонстрируются примеры распределения аэрозольной оптической толщи (АОТ) в этих зонах. Данные о содержании CO и метана в атмосфере в зонах расположения крупных промышленных центров, вос-

становленные по данным гиперспектрального комплекса AIRS/Aqua, будут представлены в другой статье.

1. Техническая и информационная база спутникового мониторинга

Программой EOS/NASA предусмотрен сброс на частоте ~8,1 ГГц данных MODIS/Terra и данных всех приборов с платформы Aqua [11]. Понятно, что принимаемая информация может быть использована в региональном центре для мониторинга при наличии вычислительных пакетов, позволяющих проводить декодирование, геопривязку и калибровку, а также восстановление геофизических параметров системы. Информационной основой представленных в настоящей статье мониторинговых наблюдений являются данные, получаемые после предварительной обработки (распаковки) принимаемых станцией EOScan в режиме прямого вещания информации MODIS/Terra и всего потока с платформы Aqua. Характеристики спутников Terra, Aqua и спектрорадиометра MODIS приведены в нашей работе [12, табл. 2 и 3].

Схема космического мониторинга с использованием данных MODIS состоит из следующих основных этапов [12]: первичной обработки данных, включающей геопривязку и калибровку; построения маски облачности по измеряемым MODIS интенсивностям; определения измеряемых величин по реализованным в центре алгоритмам, интеграции данных космического мониторинга в HDF-формате с ГИС; создания файлов (в текстовом и графическом форматах) с результатами измерений. Последовательность обработки показана на рис. 1.

Распаковка, географическая привязка и калибровка потока цифровой информации MODIS, полученной станцией в режиме прямого вещания, осуществляются с помощью пакета IMAPP (International MODIS/AIRS Processing Package), созданного в Инженерно-космическом центре Висконсинского университета (Space Science and Engineering Center, University of Wisconsin-Madison, Madison WI) [14].

Итогом процедуры геопривязки являются продукты (MOD03/Terra, MYD03/Aqua), которые дают географические координаты для каждого пикселя с километровым разрешением, высоту над уровнем моря, зенитные углы освещения, визирования, а также азимутальный угол спутника относительно Солнца.

Алгоритмы восстановления параметров атмосферы (MOD07/MYD07), аэрозольной оптической толщи (MOD04/MYD04), проведение атмосферной коррекции (MOD09/MYD09) ранее уже были рассмотрены нами (см. [12]). В данной статье обсудим алгоритм построения маски снежного покрова (MOD10/MYD10).

На основе результатов исследований [15–18], обобщающих многолетний опыт космического мониторинга снежного покрова в оптическом и ближнем ИК-диапазонах, определение пикселей изображения, покрытых снегом, осуществлялось с использованием четырех пороговых критериев. Эти критерии,

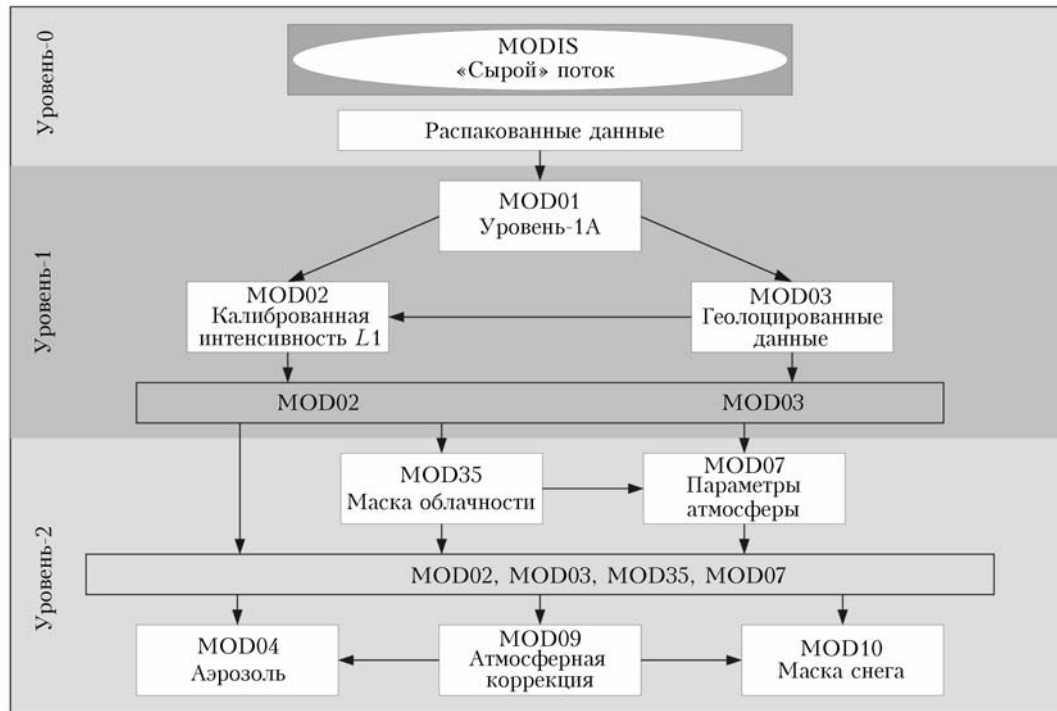


Рис. 1. Последовательность обработки данных MODIS при восстановлении характеристик атмосферы и подстилающей поверхности, проведении атмосферной коррекции

представленные в таблице, основаны на различии спектральных коэффициентов отражения снега и других элементов подстилающей поверхности (вода, почва, растительность) в диапазоне длин волн 0,5–2,5 мкм. Так, например, они учитывают, что коэффициент отражения снега очень высок в видимой части спектра $\lambda \sim 0,5-0,6$ мкм и практически равен нулю в ИК-диапазоне $\lambda \sim 1,5-1,6$ мкм (рис. 2). Вместе с тем коэффициенты отражения водных поверхностей в этих диапазонах длин волн не превышают 0,1.

Критерии при мониторинге снежного покрова с использованием данных MODIS

Номер критерия	Критерий
1	$NDSI = (R4 - R6)/(R4 + R6) \geq 0,4$
2	$R2 > 0,11$
3	$0,05 \leq NDSI \leq 0,4$
4	и $NDVI = (R2 - R1)/(R2 + R1) \in D$ $R4 \geq 0,1$

Первый критерий определяется значением нормализованного индекса снега $NDSI = (R4 - R6)/(R4 + R6) \geq 0,4$, где $R4$ и $R6$ – измеряемые MODIS коэффициенты яркости системы «атмосфера + подстилающая поверхность Земли» в 4-м и 6-м каналах соответственно. Установлено [15], что для пикселя, закрытого снегом на 50% и более, $NDSI \geq 0,4$.

Эксперименты показали, что водные объекты иногда могут иметь $NDSI$ в том же диапазоне, что и снег. Для исключения водных поверхностей из числа пикселей с $NDSI \geq 0,4$ в [15, 18] вводится второй критерий: для пикселя, покрытого снегом, ко-

эффициент отражения во втором канале $R2$ должен быть больше 0,11. Отметим, что коэффициент отражения водной поверхности в ближнем ИК-диапазоне меньше 0,1 (см. рис. 2).

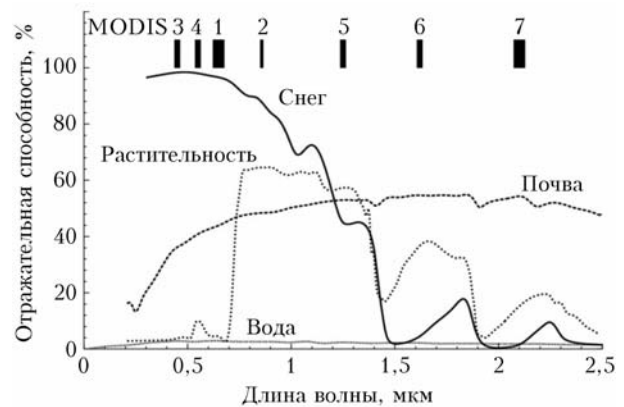


Рис. 2. Отражательная способность снега, воды, почвы, растительности (по данным [17]) и положение каналов (1–7) MODIS

Анализ данных Landsat и прототипа MODIS-спектрометра MAS, а также результатов модельных расчетов показал [16, 17], что для пикселей, покрытых снегом и лесом, значение индекса $NDSI$ может быть меньше 0,4. Было установлено, что при совместном использовании $NDSI$ и вегетационного индекса $NDVI = (R2 - R1)/(R2 + R1)$ можно корректно учесть влияние лесных массивов на отражательные характеристики подстилающей поверхности при мониторинге снежного покрова. Третий критерий, представленный в таблице, подтверждается результатами

наших исследований заснеженных лесных массивов Сибирского региона, полученными при различных условиях освещения и визирования.

Четвертый критерий ($R4 \geq 0,1$) исключает из рассмотрения «темные» (без снега) пиксели, для которых также возможны значения индекса снега $NDSI \geq 0,4$.

Эти критерии использовались нами при проведении ежедневного мониторинга снежного покрова в зоне расположения промышленных центров: Новосибирск, Кемерово, Томск, Барнаул, Заринск.

2. Наземные измерения

С 2002 г. в лаборатории экологии атмосферы ИВЭП СО РАН и НИИ экологического мониторинга при Алтайском госуниверситете проводят исследования загрязнения снежного покрова Алтайского края твердыми нерастворимыми аэрозолями. Отбор снеговых проб осуществляется в 55 пунктах в поймах рек края. С 2006 г. мониторинг был распространен и на территорию Кемеровской области.

Образцы снеговых проб в виде колонок площадью 20×20 см отбирались по методу «конверта» на всю глубину покрова в конце февраля – начале марта до начала снеготаяния, что обеспечивало максимально эффективное использование снега в качестве накопителя частиц. Пункты отбора повторялись из года в год и располагались не менее чем в 30 м от дорог и на существенном удалении от точечных источников выбросов в атмосферу.

Растапливание снега осуществлялось при комнатной температуре ($18-20$ °С), и одновременно проводилась его фильтрация. После этого определялись величина навески на фильтре и объем прошедшей через фильтр талой воды. Нерастворимый осадок счищался с фильтров в стеклянные бюксы, и из него прессовались специальные таблетки. Каждая таблетка представляла собой среднюю пробу по нескольким снежным колонкам из одного пункта отбора. Элементный анализ аэрозольных снеговых накоплений осуществлялся рентгено-флуоресцентным методом в ИЯФ СО РАН. Последующему анализу на содержание 28 элементов (Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, W, Hg, Pb, Bi, Th и U) подвергались как таблетки, так и фильтры. Были получены концентрации этих элементов, рассчитанных на 1 кг сухого вещества (мг/кг) и на 1 л талой воды (мг/л), а также поверхностная плотность загрязнения ($г/м^2$). Эти данные характеризуют в основном крупную фракцию нерастворимых и малорастворимых частиц.

3. Результаты и выводы

С целью установления зон загрязнения снежного покрова проведена обработка дневных данных MODIS/Terra – Aqua для февраля – марта 2008, 2009 и 2010 гг. Пространственная структура зон в районе промышленных центров (Новосибирск, Кемерово, Томск) на 29 марта 2009 г., восстановленная с ис-

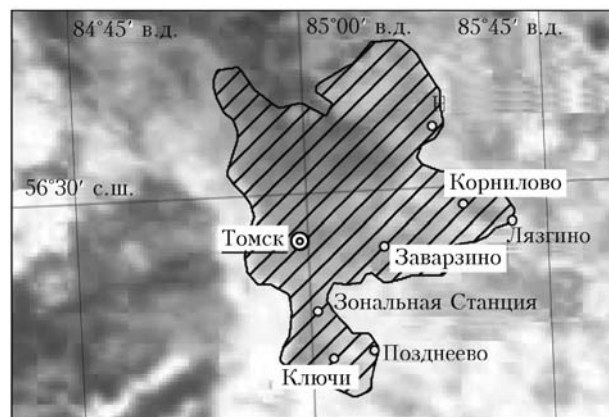
пользованием продуктов MOD35, MOD09, MOD10 и данных по альбедо, показана на рис. 3.



а



б



в

Рис. 3. Зона загрязнения снежного покрова (заштрихованная область) в районе расположения Новосибирска (а), Кемерово (б) и Томска (в) по данным спектрорадиометра MODIS

На рис. 4 приведены данные для Барнаула за 2008–2010 гг.

Распределение аэрозольной оптической толщины на длине волны $0,47$ мкм в этих зонах для апреля 2009 г., полученное в результате усреднения ежедневных данных MODIS/Terra с разрешением 1 км (продукт MOD09), показано на рис. 5.



a



б

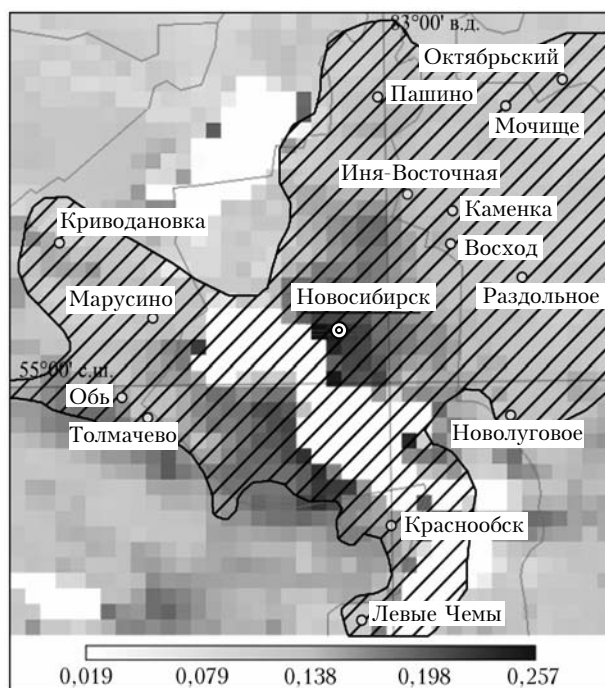


в

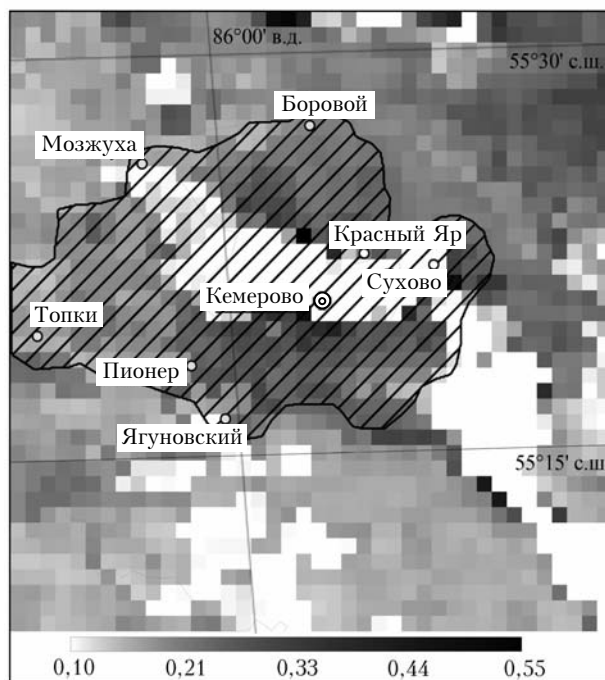
Рис. 4. Зона загрязнения снежного покрова (заштрихованная область) в районе расположения г. Барнаула по данным спектрорадиометра MODIS в 2008 (*a*), 2009 (*б*) и 2010 гг. (*в*)

Анализ полученных спутниковых и наземных данных приводит к следующим выводам.

1. Структура зон загрязнения снежного покрова перед началом снеготаяния в районе расположения промышленных центров (Новосибирск, Кемерово, Томск, Барнаул, Заринск), обусловленная хозяйственной деятельностью и мероприятиями по жизне-



a



б

Рис. 5. Средняя аэрозольная оптическая толщина атмосферы на длине волны 0,47 мкм в апреле 2009 г. для Новосибирска (*a*) и Кемерово (*б*). Заштрихованная область – зона загрязнения снежного покрова

обеспечению человека, в 2008–2010 гг. практически не изменялась.

2. Результаты наземных наблюдений по содержанию в снеге нерастворимых веществ, определяющих его альбедо, находятся в хорошем соответствии с данными космической съемки по зонам загрязнения

снега на прилегающих к центрам территориях (см., например, рис. 6).



Рис. 6. Зона загрязнения снежного покрова (заштрихованная область) в районе расположения г. Заринска по данным спектрорадиометра MODIS. Численные значения – поверхностная плотность загрязнения снега ($\text{г}/\text{м}^2$) по данным наземных наблюдений

3. Установлено, что в ряде случаев существенное влияние на структуру зоны загрязнения территории в районе расположения крупного промышленного центра оказывает орография местности. Так, например, для Алтайского коксохимического комбината, г. Заринск, выбросы в атмосферу от площадного источника распространяются в северо-западном направлении (рис. 6), что отличается от принятого западного переноса воздушных масс. Аналогичная ситуация наблюдается и для Кемеровского промышленного центра.

4. Средняя аэрозольная оптическая толщина атмосферы на длине волны 0,47 мкм в этих зонах в апреле 2009 г. достигает значений 0,3–0,5. Основываясь на установленной в ряде исследований связь АОТ с массовой концентрацией аэрозоля диаметром $D < 2,5$ мкм в приземном слое атмосферы, можно утверждать, что концентрация аэрозоля в апреле 2009 г. могла достигать $70 \text{ мкг}/\text{м}^3$.

Отметим, что восстановленная по спутниковым и наземным данным зона загрязнения Заринского промышленного центра по результатам [19] соответствует области максимальных дозовых нагрузок на среду обитания этой территории.

Работа поддержана Проектом № 16 «Комплексный мониторинг современных климатических и экосистемных изменений» (Программа президиума РАН № 10 «Окружающая среда в условиях изменяющегося климата: экстремальные природные явления и катастрофы») и Программой IV.31.2. «Новые ГИС и веб-технологии, включая методы искусственного интеллекта, для поддержки междисциплинарных научных исследований сложных природных, технических и социальных систем с учетом их взаимодействия».

1. Адаменко М.Ф., Алехина Н.М., Горбатенко В.П., Задде Г.О., Кабанов М.В., Катаев С.Г., Комаров В.С.,

Кускусов А.И., Нарожный Ю.К., Окишев П.А., Русанов В.И., Сальников В.Н., Шитов А.В., Шишлов В.И. Региональный мониторинг атмосферы. Часть 4. Природно-климатические изменения: Коллективная монография / Под общей ред. М.В. Кабанова. Томск: МГП «Раско», 2000. 270 с.

2. Trenberth K.E., Jones P.D., Ambenje P., Bojariu R., Easterling D., Klein Tank A., Parker D., Rahimzadeh F., Renwick J.A., Rusticucci M., Soden B., Zhai P. Observations: Surface and Atmospheric Climate Change // Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007. 996 p.
3. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007. 996 p.
4. Аэрозоль и климат / Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 542 с.
5. Кондратьев К.Я. Атмосферный аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. I. Свойства аэрозоля различных типов // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 1. С. 5–24.
6. Haywood J., Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: a review // Rev. Geophys. 2000. V. 38, N 4. P. 513–543.
7. Kaufman Y.J., Tanre D., Boucher O. A satellite view of aerosols in climate system // Nature (Gr. Brit.). 2002. V. 419, N 6903. P. 215–223.
8. Sellers P.J., Meeson B.W., Hall F.G., Asrar G., Murphy R.E., Schiffer R.A., Bretherton F.P., Dickinson R.E., Ellingson R.G., Field C.B., Huemmrich K.F., Justice C.O., Melack J.M., Roulet N.T., Schimel D.S., Try P.D. Remote sensing of the land surface for studies of global change: models – algorithms – experiments // Remote Sens. Environ. 1995. V. 51, N 1. P. 3–26.
9. Salomonson V.V., Barnes W.L., Maymon P.W., Montgomery H.E., Ostrov H. MODIS: Advanced facility instrument for studies of the Earth as a system // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 1989. V. 27, N 2. P. 145–153.
10. Kaufman Y.J., Herring D.D., Ranson K.J., Collatz G.J. Earth Observing System AM1 mission to Earth // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 1998. V. 36, N 4. P. 1045–1055.
11. Parkinson C.L. Aqua: An earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 2003. V. 41, N 2. P. 173–183.
12. Лагутин А.А., Никулин Ю.А., Жуков А.П., Лагутин Ал.А., Резников А.Н., Синицин В.В., Шмаков И.А. Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. Ч. 1. MODIS // Вычисл. технол. 2007. Т. 12, № 2. С. 67–89.
13. Лагутин А.А., Никулин Ю.А., Шмаков И.А., Жуков А.П., Лагутин Ал.А., Резников А.Н., Синицин В.В. Восстановление характеристик подстилающей поверхности Сибирского региона по данным спектрорадиометра MODIS // Вычисл. технол. 2006. Т. 11. Ч. 1, № 4. С. 61–71.

14. Huang H.-L., Gumley L.E., Strabala K., Li J., Weisz E., Rink T., Baggett K.C., Davies J.E., Smith W.L., Dodge J.C. International MODIS and AIRS processing package (IMAPP). A direct broadcast software package for the NASA Earth Observing System // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2004. V. 85, N 2. P. 159–161.
15. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data // Remote Sens. Environ. 1995. V. 54, N 2. P. 127–140.
16. Hall D.K., Foster J.L., Verbyla D.L., Klein A.G., Benson C.S. Assessment of snow-cover mapping accuracy in a variety of vegetation-cover densities in central Alaska // Remote Sens. Environ. 1998. V. 66, N 2. P. 129–137.
17. Klein A.G., Hall D.K., Riggs G.A. Improving snow cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model // Hydrol. Process. 1998. V. 12, N 10–11. P. 1723–1744.
18. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V., DiGirolamo N.E., Bayr K.J., Jin J.M. MODIS snow-cover products // Remote Sens. Environ. 2002. V. 83, N 1–2. P. 181–194.
19. Суторихин И.А., Баландович Б.А., Ла А.Ю., Скрипкина Л.А. Оценка канцерогенного риска населения Алтайского края на основе анализа дозовых нагрузок при радиационном воздействии на среду обитания // Материалы VII Всерос. симпоз. «Контроль окружающей среды и климата «КОСК-2010». Томск, 2010. С. 81–82.

A.A. Lagutin, I.A. Sutorikhin, V.V. Sinitsin, A.P. Zhukov, I.A. Shmakov. **The monitoring of the large industrial centers of the South of West Siberia, using the MODIS and field observation data.**

This paper relates the approaches and computational technologies, used at the Center for Remote Sensing, Altai State University, to retrieve the land surface variables (albedo; normalized difference snow index, NSDI) on a near-real time basis, determine the spatial structure of the areas of technogenic pollution of a large industrial center, estimate the aerosol optical depth of the atmosphere, using the MODIS/(Terra + Aqua) data. The areas of technogenic pollution for Novosibirsk, Kemerovo, Tomsk, Barnaul, Zarinsk, determined using the MODIS data (MOD35, MOD09, MOD10, and albedo data products) at winter period (2008–2010) are presented, as well as the distributions of the aerosol optical thickness (AOT) for these areas. It is shown that the areas determined are in agreement with results of the field observations.