

## Технологии обработки данных спутникового мониторинга и реанализа для оценки состояния атмосферы воздуха Красноярской агломерации

А. В. ДЕРГУНОВ<sup>1</sup>, К. В. КРАСНОЩЕКОВ<sup>1</sup>, О. Э. ЯКУБАЙЛИК<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>ФИЦ Красноярский научный центр СО РАН, 660036, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН, 660036, Красноярск, Россия

\*Контактный автор: Якубайлик Олег Эдуардович, e-mail: oleg@icm.krasn.ru

Поступила 06 мая 2022 г., принята в печать 13 мая 2022 г.

Рассмотрены методы оценки загрязнения атмосферы Красноярска и его окрестностей на основе совместной обработки и анализа данных системы наземного мониторинга, метеоинформации NCEP GFS, нескольких спутниковых продуктов. Показана корреляция между уровнем загрязнения воздуха и метеоданными — порывами ветра и температурными инверсиями, определяемыми по данным реанализа GFS на основе разницы температур на изобарических поверхностях. Спутниковые данные MODIS MAIAC по загрязнению атмосферы хорошо коррелируют с результатами наземного мониторинга, что позволяет рекомендовать их в качестве рабочего инструмента для оценки загрязнения пригородной территории, где отсутствуют станции наземного мониторинга. По данным дистанционного зондирования Земли MAIAC и Sentinel-5P построены карты загрязнения территории Красноярска и его окрестностей.

*Ключевые слова:* температурная инверсия, загрязнение воздуха, GFS, взвешенные частицы, PM<sub>2.5</sub>, MAIAC, AOD, Красноярск.

*Цитирование:* Дергунов А.В., Краснощекков К.В., Якубайлик О.Э. Технологии обработки данных спутникового мониторинга и реанализа для оценки состояния атмосферы воздуха Красноярской агломерации. Вычислительные технологии. 2022; 27(3):84–94. DOI:10.25743/ICT.2022.27.3.007.

### Введение

Качество атмосферного воздуха — важнейший экологический фактор, определяющий состояние экосистем и здоровье населения. Загрязнение атмосферы обусловлено естественными природными и антропогенными процессами. К природным источникам загрязнения относятся извержения вулканов и пылевые бури, лесные пожары, продукты растительного, животного и микробиологического происхождения. Антропогенное загрязнение связано с воздействием человека на окружающую среду. Вследствие работы промышленных предприятий и выбросов автотранспорта, работы автономных источников теплоснабжения и многих других причин в воздухе образуются частицы пыли и ядовитые газы, различные токсичные неорганические и органические соединения [1].

Твердые компоненты атмосферных аэрозолей в ряде случаев особенно опасны для организмов, а у людей вызывают специфические сердечно-сосудистые и респираторные заболевания [2]. Исследования показывают высокую степень корреляции между повышенными концентрациями взвешенных в воздухе твердых частиц (РМ) и ухудшением здоровья людей [3]. Обнаружено, что повышенная концентрация РМ в воздухе может быть причиной повышенной смертности населения [4, 5]. Анализ воздействия загрязнения воздуха на продолжительность жизни в пяти основных городах Эстонии [6] показал, что среднее снижение продолжительности жизни в загрязненных городских центрах равно одному году. По результатам обработки экологических и медицинских данных по 29 крупным городам Европы в работе [7] установлена статистически достоверная взаимосвязь повышения концентрации взвешенных частиц РМ<sub>10</sub> (с диаметром менее 10 мкм) и увеличения смертности от сердечно-сосудистых и респираторных заболеваний. В работах [8, 9] сообщается о корреляции между повышенной концентрацией взвешенных частиц РМ<sub>2.5</sub> (с диаметром менее 2.5 мкм) и высоким уровнем распространенности респираторных заболеваний и связанной с ним частотой госпитализаций.

Данные экологического мониторинга показывают, что уровень загрязнения атмосферы неравномерный. С одной стороны, он определяется сезонными факторами, например повышением концентрации вредных веществ в зимний период вследствие интенсивной работы автономных источников теплоснабжения (печное отопление и т. п.) [10, 11]. Подобные изменения, как правило, имеют плавный характер, так как выбросы предприятий, автотранспорта, автономных источников теплоснабжения в среднем не имеют резких колебаний, следуют за изменением среднесуточной температуры. С другой стороны, вследствие быстро меняющихся метеоусловий в приземном слое атмосферного воздуха могут возникать ситуации, приводящие к резкому изменению уровня загрязнения. Например, это может быть сильный ветер, который очищает атмосферу, или температурная инверсия, способствующая накоплению загрязняющих веществ. Поэтому становится актуальной задача совместного анализа данных по уровню загрязнения атмосферы и метеоинформации для изучения их взаимосвязей с целью поиска условий, приводящих к ухудшению экологической обстановки.

Повышенный уровень загрязнения воздуха может быть вызван температурными инверсиями в атмосфере. Так, в приземном слое атмосферы на разных высотах располагаются слои большей или меньшей толщины, в которых убывание температуры сильно замедляется, прекращается или, наоборот, вместо убывания температуры с высотой происходит ее увеличение. Свойствами температурных инверсий являются высота нижней и верхней границы, вертикальная мощность (толщина слоя) и интенсивность (величина инверсии). Температурные инверсии делят на три типа: приземные (нижняя граница расположена на уровне земли), приподнятые (нижняя граница — на некоторой высоте от поверхности) и инверсии свободной атмосферы (высота может сильно различаться) [12–14].

Наборы метеоданных можно получить, например, от наземных станций мониторинга окружающей среды. К достоинствам такой метеоинформации можно отнести довольно высокую точность измерений на месте. Однако такие наборы данных ограничены базовыми параметрами, а сами наземные станции могут располагаться на большом удалении друг от друга, что накладывает определенные ограничения на пространственный охват решаемой задачи.

Альтернативным вариантом могут служить метеоданные, полученные с использованием различных моделей прогноза погоды, например модели Global Forecast System.

Эти источники предоставляют множество различных слоев метеоинформации на десятках вертикальных уровней, нанесенных на регулярные прямоугольные сетки, покрывающие весь земной шар. Пространственное разрешение таких данных может варьироваться от 2.5 до 0.25 град. и выше [15]. Разработчики стараются регулярно улучшать этот параметр.

В настоящей работе экологическая обстановка оценивалась по уровню концентрации взвешенных частиц  $PM_{2.5}$ , который предоставляет система мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН, состоящая из 25 станций. Каждая станция предоставляет информацию о загрязнении воздуха, температуре, давлении и относительной влажности.

Наземные наблюдения со станций мониторинга показывают важную пространственную и временную информацию о концентрациях РМ в атмосфере города. Однако даже самая подробная городская сеть мониторинга не может обеспечить региональное покрытие, сведения об уровне загрязнения за пределами городской черты. Логичным дополнением к данным городской сети мониторинга могут стать результаты исследования загрязнения, полученные с помощью спутникового дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Совместная обработка данных наземного мониторинга с данными ДЗЗ обеспечивает возможность расширения пространственно-временного охвата исследуемой территории, оценки влияния пригородной зоны на загрязнение города и его временной динамики. При наличии данных ДЗЗ с хорошим пространственным разрешением появляется возможность анализа загрязнения атмосферы по городским районам и микрорайонам, оценки влияния на экологию города вынесенных за городскую черту промышленных объектов и массивов индивидуальных жилых домов с печным отоплением в пригородной зоне.

Для оценки наличия аэрозолей в атмосфере был использован алгоритм MAIAC, который по данным MODIS со спутников Terra и Aqua определяет аэрозольную оптическую толщину AOD и ряд других характеристик атмосферы с пространственным разрешением 1 км. Данные MAIAC начиная с 2018 г. являются стандартным продуктом MODIS. С их помощью можно оценить влияние локальных источников выбросов на экологическую обстановку и определить внешнее воздействие атмосферы города на окружающие территории.

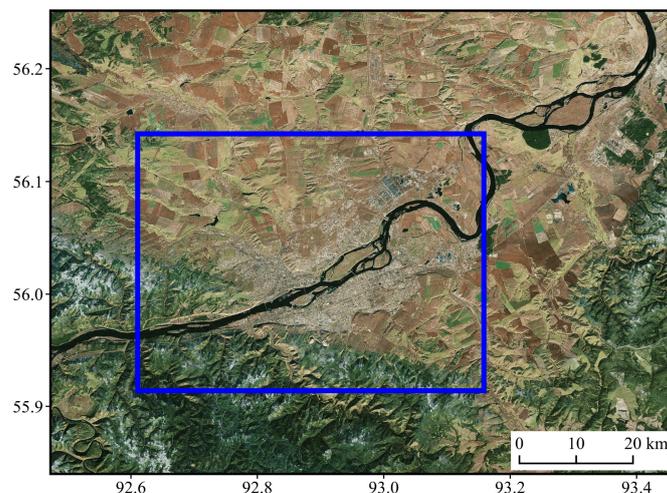


Рис. 1. Район исследования

Fig. 1. Research area

В данной работе приводятся исследования по оценке загрязнения атмосферы Красноярска и части прилегающих территорий (рис. 1). Город с населением более 1 млн человек, площадью около 400 км<sup>2</sup>, является региональным центром Красноярского края. Координаты центра города 56°00' с. ш. и 92°52' в. д. Территория района исследования имеет уникальный рельеф. С юга и запада от города — леса и холмистая местность, с севера и востока рельеф преимущественно равнинный. Незамерзающая зимой река Енисей делит город примерно пополам. Как и во всех крупных городах, на экологическую обстановку Красноярска негативно влияют различные антропогенные факторы. Автотранспорт, частный сектор, ТЭЦ, крупные предприятия металлургической, машиностроительной и химической промышленности — все это вследствие большого количества выбросов в атмосферу негативно сказывается на качестве окружающего воздуха. В [16] показано, что концентрация РМ<sub>2.5</sub> в Красноярске на 64 % выше, чем в среднем по России.

## 1. Обработка данных реанализа NCEP GFS

В связи с необходимостью выявления факторов, влияющих на ухудшение экологической обстановки в Красноярске, возникает потребность в исследовании атмосферных процессов с помощью наборов метеорологических данных.

В настоящей работе использована метеоинформация набора данных модели Global Forecast System (GFS), а именно: фактические данные анализа температуры воздуха на трех вертикальных уровнях, соответствующих трем изобарическим поверхностям: 1000, 925 и 850 мбар, а также информация о порывах ветра (GUST) для зимних периодов (ноябрь–февраль) 2019, 2020 и 2021 г. С января 2015 г. горизонтальное разрешение данных составляет 0.25 град. (около 25 км на широте города Красноярска) [15]. Метеоданные модели GFS распространяются свободно, т. е. доступны бесплатно на портале National Center for Atmospheric Research (NCAR, <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1>).

Для анализа временной динамики изменения выбранных метеорологических параметров, получения трендов и интегральных показателей создан набор прикладных программ (скриптов) на языке программирования Python, использующих утилиту NCEP wgrib2 [17], с помощью которых осуществлялась предварительная обработка исходных данных. Выявление слоев температурной инверсии производилось путем получения разности между данными о температурах на различных вертикальных уровнях, когда разность давала отрицательное значение. Например, при отрицательной разности между температурами на изобарических поверхностях 1000 и 925 мбар инверсия считалась приземной или приподнятой, если между 925 и 850 мбар — приподнятой или высотной (инверсия свободной атмосферы).

Информация о среднесуточных концентрациях взвешенных в воздухе твердых частиц РМ<sub>2.5</sub> получена из сети наземных станций мониторинга Красноярского научного центра СО РАН.

Анализ данных показал высокий уровень корреляции между наличием температурных инверсий и периодами повышенного загрязнения взвешенными частицами РМ<sub>2.5</sub>. Во время всего периода исследования в 81 % случаев превышение среднесуточного значения предельно допустимой концентрации (ПДК) РМ<sub>2.5</sub> сопровождалось температурными инверсиями.

Были выбраны дни, когда детектировались одновременно и среднесуточные концентрации  $PM_{2.5}$ , превышающие среднесуточное значение ПДК, и температурные инверсии атмосферы, всего 105 из 130 дней с повышенным уровнем загрязнения воздуха за весь период исследования. Установлена устойчивая связь между вариациями значений интенсивности температурных инверсий ( $\Delta T$ ) и среднесуточных концентраций  $PM_{2.5}$  для выбранных 105 дней с повышенным загрязнением атмосферы (рис. 2). О согласованности интенсивности приземных температурных инверсий  $\Delta T$  и среднесуточных концентраций  $PM_{2.5}$  свидетельствует коэффициент корреляции 0.6 (рис. 3).

В результате анализа отдельных зимних периодов для выбранных трех лет установлена тенденция к снижению доли дней с повышенным загрязнением относительно количества дней с температурными инверсиями (рис. 4). В зимний период 2019 г. количество дней с инверсиями температуры составило 65, дней с загрязнением — 41, а для 2021 г. — 64 и 33 дня соответственно. Доля дней с загрязнением атмосферы относительно количества дней с температурными инверсиями за три года уменьшилась на 11 %. Дополнительно по данным модели GFS рассматривалась взаимосвязь скорости порывов ветра и изменения среднесуточных концентраций  $PM_{2.5}$  для всего периода исследования. Корреляция составила  $-0.67$ , что указывает на высокую обратную зависимость выбранных параметров. Полученные выводы говорят о высокой применимости данных реанализа GFS в задачах экологического мониторинга окружающей природной среды Красноярска и прилегающих территорий.

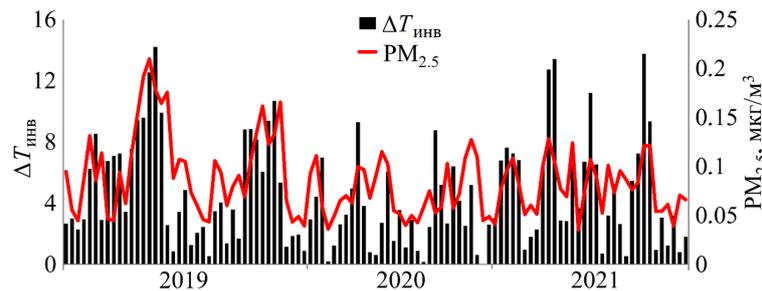


Рис. 2. Динамика изменения концентрации  $PM_{2.5}$  и интенсивности инверсий  $\Delta T$  в периоды повышенного загрязнения воздуха зимой 2019, 2020 и 2021 гг.

Fig. 2. Dynamics of changes in  $PM_{2.5}$  concentrations and intensity of  $\Delta T$  inversions during periods of increased air pollution in winter 2019, 2020 and 2021

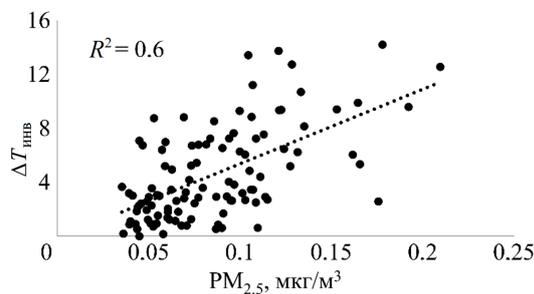


Рис. 3. Сравнение значений интенсивности инверсий  $\Delta T$  и среднесуточных концентраций  $PM_{2.5}$

Fig. 3. Comparison of the values of the intensity of inversions  $\Delta T$  and average daily concentrations of  $PM_{2.5}$

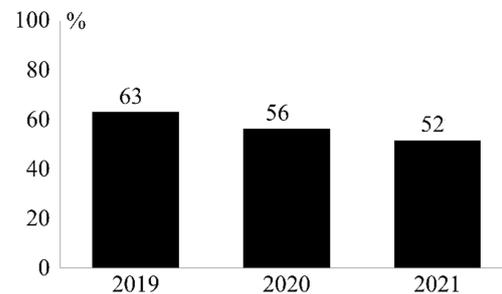


Рис. 4. Изменение доли дней с загрязнением относительно количества дней с инверсиями за три года

Fig. 4. Change in the proportion of days with pollution, relative to the number of days with inversions over 3 years

## 2. Обработка данных дистанционного зондирования

Существуют различные подходы для получения концентрации РМ с использованием данных дистанционного зондирования. В работе [18] для определения концентрации РМ<sub>10</sub> в городе Сиань (Китай) и его окрестных территориях используется параметр АОД, полученный по данным со спектрорадиометра MODIS, установленного на спутниках Terra и Aqua. Для пересчета параметра АОД в единицы измерения концентраций РМ авторы используют эмпирическую модель, созданную на основе уравнения линейной множественной регрессии, в которой наряду с параметром АОД используют значения высоты планетарного пограничного слоя (PBLH), скорость ветра, температуру, дальность видимости и относительную влажность воздуха. В результате расчетов авторам удалось добиться корреляции  $R^2 = 0.8$ .

В работе [19] были проведены исследования корреляции между параметром РМ<sub>10</sub> и параметром АОД над юго-восточной территорией Франции. Здесь авторы использовали значения АОД, полученные на длине волны 440 нм. Перевод значений АОД в единицы измерений РМ (мкг/м<sup>3</sup>) производился линейным методом, без использования сопутствующих метеопараметров. Данные имеют различные коэффициенты корреляции в зависимости от сезона, однако среднее значение  $R^2 = 0.69$ . Утверждается, что этот невысокий коэффициент корреляции связан с тем, что для изучения выбрана слишком большая область и при уменьшении района исследования показатель корреляции может быть существенно выше. Однако в работе [20] областью исследования была большая часть Китая, но иной подход к пересчету значения спутниковых данных позволил получить сходимость данных до уровня  $R^2 = 0.9$ . Авторы использовали методику перерасчета, включающего как метеопараметры, так и гигроскопические свойства аэрозоля. В статье отмечается, что значения корреляции для территории Китая меняются в зависимости от региона, что может быть вызвано различными типами загрязнения.

Так как аэрозоль меняет свои свойства из-за влажности и у каждого района пыль может иметь свой характерный состав, возникает необходимость проверить данный метод на территории Красноярска, поскольку только он учитывает изменения свойств аэрозоля в зависимости от условий окружающей среды.

В настоящей работе использован продукт MODIS MAIAC, который предоставляет данные по АОД на основе информации со спектрорадиометра MODIS. К сожалению, данные АОД недоступны на территорию с высоким коэффициентом отражения, которым обладает снег, поэтому в работе рассматривалось загрязнение атмосферы Красноярска в летние месяцы 2019, 2020 и 2021 гг.

Для верификации спутниковых данных использовалась сеть наземного мониторинга Красноярского научного центра СО РАН. Исследовались данные станций мониторинга по концентрации РМ<sub>2,5</sub> и влажности воздуха.

Для пересчета данных АОД использована приведенная в [20] формула

$$\text{PM}_{\text{calc}} = \frac{\text{AOD}/\text{PBLH}}{K[(1 - \text{RH})/(1 - \text{RH}_0)]^{-\gamma}}, \quad (1)$$

где PBLH — высота пограничного слоя атмосферы, RH — относительная влажность воздуха, RH<sub>0</sub> — среднее значение влажности воздуха для выбранной территории, переменные  $\gamma$  и  $K$  — аэрозольные характеристики из [16].

Данные спутникового и наземного мониторинга “шагренировались”, усреднялись по пространству города для определения среднегородских значений. Полученные временные ряды данных сравнивались между собой.

Основные результаты работы состоят в следующем. Коэффициент корреляции между наземными данными  $PM_{2.5}$  и расчетными значениями  $PM\_calc$ , вычисленными по спутниковым данным AOD на основе линейной модели [19], составил  $R^2 = 0.5$ , что указывает на довольно низкую согласованность данных. Однако использование более точной модели по формуле (1) из работы [20] позволяет достигнуть коэффициента корреляции  $R^2 = 0.84$  (рис. 5).

Учитывая метеопараметры и гигроскопические свойства аэрозоля, которые для Красноярска взяты из [16], удалось значительно увеличить коэффициент корреляции между спутниковыми и наземными данными. Отсюда следует, что данные спутникового мониторинга можно использовать в дополнение к данным наземных постов наблюдения с целью улучшения оценки экологической обстановки в Красноярске.

Главным преимуществом данных спутникового мониторинга является возможность построения пространственного распределения различных аэрозолей. Кроме данных AOD, формируемых на основе спектрорадиометра MODIS, схожую информацию можно получить с помощью других приборов. Например по данным прибора TROPOMI, установленного на спутнике Sentinel-5P, можно получать пространственную информацию о распределении концентраций озона, диоксида серы, диоксида азота, метана и формальдегида с различным пространственным и временным разрешением. В качестве примера на рис. 6 показано среднемесячное распределение диоксида азота в атмосфере над центральной частью Красноярского края. Аналогичным образом можно построить и карту среднемесячных значений AOD по данным MAIAC. Для иллюстрации выбрана территория Красноярска и окрестностей. На рис. 7 приведены усредненные значения оптической толщины AOD за октябрь 2020 г. Такой выбор обусловлен тем, что в этом году снег выпал в ноябре, а морозные температуры уже установились на всей территории, соответственно, начался отопительный сезон, т.е. в указанный период должны проявляться автономные источники теплоснабжения (печное отопление) в пригороде Красноярска.

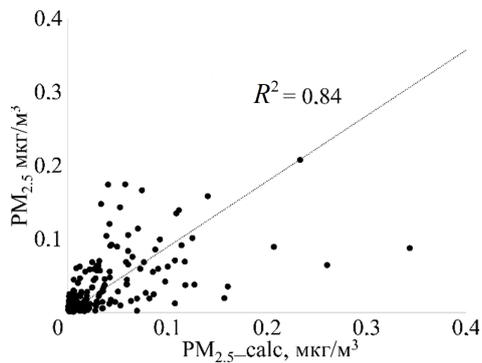


Рис. 5. Сравнение спутниковых ( $PM_{2.5\_calc}$ ) и наземных значений  $PM_{2.5}$

Fig. 5. Comparison of satellite ( $PM_{2.5\_calc}$ ) and ground  $PM_{2.5}$  values

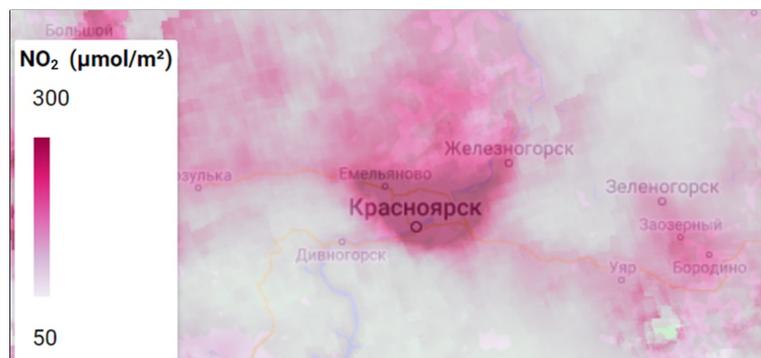


Рис. 6. Среднемесячные концентрации диоксида азота  $NO_2$  в атмосфере Красноярска и его окрестностях в октябре 2020 г.

Fig. 6. Average monthly concentrations of nitrogen dioxide  $NO_2$  in atmosphere of Krasnoyarsk and the surrounding area in October 2020

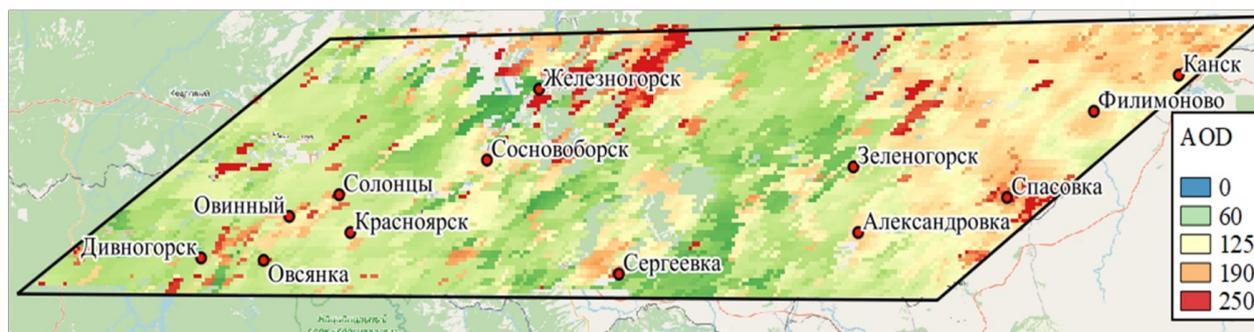


Рис. 7. Среднемесячные значения аэрозольной оптической толщины AOD за октябрь 2020 г.  
Fig. 7. Monthly average values of aerosol optical depth (AOD) for October 2020

На карте темный цвет соответствует более высоким значениям AOD. Также на рассматриваемой территории имеются пробелы, связанные с отсутствием безоблачных данных. На карте можно увидеть области повышенных значений концентрации AOD вокруг таких населенных пунктов, как Железногорск, Спасовка, Сергеевка, Канск, Солонцы, Овсянка и северо-западная часть Красноярска, где расположено большое количество строений частного сектора с печным отоплением.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что подход, основанный на использовании спутниковой информации по загрязнению атмосферы, имеет хорошие перспективы.

## Заключение

Показан значительный потенциал совместного анализа данных наземных наблюдений, метеоинформации реанализа и ДЗЗ в исследованиях загрязнения атмосферы промышленного города. Разработана методика, обеспечивающая получение временной динамики возникновения инверсий температуры и их интенсивности по данным реанализа GFS. Показаны взаимосвязь температурных инверсий и периодов повышенного загрязнения воздуха, а также влияние интенсивности инверсий и порывов ветра на величину концентрации загрязняющих веществ. Выполнено сравнение спутниковых данных MAIAC по загрязнению атмосферы Красноярска с данными станций наземного мониторинга. Построена карта распределения атмосферного загрязнения по данным продукта MAIAC на территорию Красноярска и его пригородов.

Полученные результаты говорят о высокой применимости данных спутникового мониторинга и реанализа в задачах экологического мониторинга окружающей природной среды. Комплексный подход к решению задачи обладает рядом преимуществ, поскольку спутниковые данные имеют большой пространственный охват, а данные реанализа доступны для любой местности, не только там, где имеются наземные станции мониторинга.

## Список литературы

- [1] Зарубин Г.П., Новиков Ю.В. Гигиена города. М.: Медицина; 1986: 272.
- [2] Kaufman Yo.J., Tanre D., Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system. Nature. 2002; 419(6903):215–223. DOI:10.1038/nature01091.

- [3] **Brunekreef B., Holgate S.T.** Air pollution and health. *Lancet*. 2002; 360(9341):1233–1242. DOI:10.1016/S0140-6736(02)11274-8.
- [4] **Nemmar A., Hoet P.H.M., Vanquickenborne B., Dinsdale D., Thomeer M., Hoylaerts M.F., Vanbilloen H., Mortelmans L., Nemery B.** Passage of inhaled particles into the blood circulation in humans. *Circulation*. 2002; (105):411–414. DOI:10.1161/hc0402.104118.
- [5] **Helfand W.H., Lazarus J., Theerman P.** Donora, Pennsylvania: an environmental disaster of the 20th century. *American Journal of Public Health*. 2001; 91(4):553. DOI:10.2105/ajph.91.4.553.
- [6] **Helfand W.H., Lazarus J., Theerman P.** Health impacts of particulate matter in five major Estonian towns: main sources of exposure and local differences. *Air Quality, Atmosphere and Health*. 2011; 4(3–4):247–258. DOI:10.1007/s11869-010-0075-6.
- [7] **Analitis A., Katsouyanni K., Dimakopoulou K., Samoli E., Nikoloulopoulos A., Petasakis Y., Touloumi G., Schwartz J., Anderson H.R., Cambra K., Forastiere F., Zmirou D., Vonk J.M., Clancy L., Kriz B., Bobvos J., Pekkanen J.** Short-term effects of ambient particles on cardiovascular and respiratory mortality. *Epidemiology*. 2006; 17(2):230–233. DOI:10.1097/01.ede.0000199439.57655.6b.
- [8] **Zanobetti A., Franklin M., Koutrakis P., Schwartz J.** Fine particulate air pollution and its components in association with cause-specific emergency admissions. *Environmental Health*. 2009; 8(1):1–12. DOI:10.1186/1476-069X-8-58.
- [9] **Dominici F., Peng R.D., Bell M.L., Pham L., McDermott A., Zeger S.L., Samet J.M.** Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases. *The Journal of the American Medical Association*. 2006; 295(10):1127–1134. DOI:10.1001/jama.295.10.1127.
- [10] **Беккер А.А., Агаев Т.Б.** Охрана и контроль загрязнения природной среды. Л.: Гидрометеоиздат; 1989: 287.
- [11] **Еремкин А.И., Квашнин И.М., Юнкеров Ю.И.** Нормирование выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. М.: Издательство АСВ; 2000: 170.
- [12] **Матвеев Л.Т.** Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат; 1984: 752.
- [13] **Безуглая Э.Ю., Расторгуева Г.П., Смирнова И.В.** Чем дышит промышленный город. Л.: Гидрометеоиздат; 1991: 251.
- [14] **Зуев В.Е., Красненко Н.П., Федоров В.А., Фурсов М.Г.** Акустическое зондирование пограничного слоя атмосферы. Доклады АН СССР. 1981; 257(5):1092–1096. Адрес доступа: <http://mi.mathnet.ru/dan44384> (дата обращения 05.05.2022).
- [15] The Global Forecast System (GFS) documentation. Адрес доступа: [https://nomads.ncep.noaa.gov/txt\\_descriptions/GFS\\_doc.shtml](https://nomads.ncep.noaa.gov/txt_descriptions/GFS_doc.shtml) (дата обращения 05.05.2022).
- [16] **Lin C., Labzovskii L., Mak H., Fung J., Lau A., Kenea S., Bilal M., Hey J., Lu X., Ma J.** Observation of PM<sub>2.5</sub> using a combination of satellite remote sensing and low-cost sensor network in Siberian urban areas with limited reference monitoring. *Atmospheric Environment*. 2020; (227):117410. DOI:10.1016/j.atmosenv.2020.117410.
- [17] Wgrib2 utility to read and write grib2 files. Адрес доступа: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/wgrib2> (дата обращения 05.05.2022).
- [18] **You W., Zang Z., Zang L., Li Z., Chen D., Zhang G.** Estimating ground-level PM<sub>10</sub> concentration in Northwestern China using geographically weighted regression based on satellite

- AOD combined with CALIPSO and MODIS fire count. Remote Sensing of Environment. 2015; (168):276–285. DOI:10.1016/j.rse.2015.07.020.
- [19] **Péré J.C., Pont V., Mallet M., Bessagnet B.** Mapping of PM10 surface concentrations derived from satellite observations of aerosol optical thickness over south-eastern France. Atmospheric Research. 2009; 91(1):1–8. DOI:10.1016/j.atmosres.2008.05.001.
- [20] **Lin C., Li Y., Yuan Z., Lau A., Li C., Fung J.** Using satellite remote sensing data to estimate the high-resolution distribution of ground-level PM2.5. Remote Sensing of Environment. 2015; (156):117–128. DOI:10.1016/j.rse.2014.09.015.

---

Вычислительные технологии, 2022, том 27, № 3, с. 84–94. © ФИЦ ИВТ, 2022  
Computational Technologies, 2022, vol. 27, no. 3, pp. 84–94. © FRC ICT, 2022

ISSN 1560-7534  
eISSN 2313-691X

---

INFORMATION TECHNOLOGIES

---

DOI:10.25743/ICT.2022.27.3.007

**Satellite monitoring and reanalysis data processing technology for assessing the state of the air in the Krasnoyarsk agglomeration**

DERGUNOV ALEXANDER V.<sup>1</sup>, KRASNOSHCHIEKOV KONSTANTIN V.<sup>1</sup>, YAKUBAILIK OLEG E.<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS, 660036, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Computational Modeling SB RAS, 660036, Krasnoyarsk, Russia

\*Corresponding author: Yakubailik Oleg E., e-mail: oleg@icm.krasn.ru

Received May 06, 2022, accepted May 13, 2022.

**Abstract**

The subject of present research work is methods for assessing the ecological state of the atmosphere of Krasnoyarsk and its surroundings, based on the joint processing of initial information on air pollution of various types. We considered data for three winter seasons — from November to February, in 2019, 2020 and 2021, a total of 12 winter months. All available data from the urban network of ground monitoring stations, satellite data from the MODIS MAIAC instrument, and weather data from the NCEP GFS reanalysis model were processed. Analysis of the data allows revealing the relationship between the increased level of atmospheric pollution and the periods of temperature inversions determined by the temperature difference on isobaric surfaces in the surface layer of the atmosphere. It was found that the proportion of days with temperature inversion among the total number of days exceeding the average daily PM<sub>2.5</sub> maximum permissible concentration for the entire observation period under consideration is 81 %. Comparative analysis of data on the level of air pollution obtained from ground-based monitoring stations and as a result of processing MODIS MANIAC satellite information shows a high degree of their agreement, the coefficient of determination  $R^2 = 0.84$ . The work also considered data from the TROPOMI Sentinel-5P instrument, which allow obtaining detailed spatial information on gaseous harmful substances. Based on remote sensing data from MANIAC and Sentinel-5P, pollution maps of the territory of Krasnoyarsk and its environs were built.

*Keywords:* temperature inversion, air pollution, GFS, particulate matter, PM<sub>2.5</sub>, MAIAC, AOD, Krasnoyarsk.

*Citation:* Dergunov A.V., Krasnoshchekov K.V., Yakubailik O.E. Satellite monitoring and reanalysis data processing technology for assessing the state of the air in the Krasnoyarsk agglomeration. Computational Technologies. 2022; 27(3):84–94. DOI:10.25743/ICT.2022.27.3.007. (In Russ.)

## References

1. **Zarubin G.P., Novikov Yu.V.** *Gigiena goroda* [City hygiene]. Moscow: Meditsina; 1986: 272. (In Russ.)
2. **Kaufman Yo.J., Tanre D., Boucher O.** A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*. 2002; 419(6903):215–223. DOI:10.1038/nature01091.
3. **Brunekreef B., Holgate S.T.** Air pollution and health. *Lancet*. 2002; 360(9341):1233–1242. DOI:10.1016/S0140-6736(02)11274-8.
4. **Nemmar A., Hoet P.H.M., Vanquickenborne B., Dinsdale D., Thomeer M., Hoylaerts M.F., Vanbilloen H., Mortelmans L., Nemery B.** Passage of inhaled particles into the blood circulation in humans. *Circulation*. 2002; (105):411–414. DOI:10.1161/hc0402.104118.
5. **Helfand W.H., Lazarus J., Theerman P.** Donora, Pennsylvania: an environmental disaster of the 20th century. *American Journal of Public Health*. 2001; 91(4):553. DOI:10.2105/ajph.91.4.553.
6. **Helfand W.H., Lazarus J., Theerman P.** Health impacts of particulate matter in five major Estonian towns: main sources of exposure and local differences. *Air Quality, Atmosphere and Health*. 2011; 4(3–4):247–258. DOI:10.1007/s11869-010-0075-6.
7. **Analitis A., Katsouyanni K., Dimakopoulou K., Samoli E., Nikoloulopoulos A., Petasakis Y., Touloumi G., Schwartz J., Anderson H.R., Cambra K., Forastiere F., Zmirou D., Vonk J.M., Clancy L., Kriz B., Bobvos J., Pekkanen J.** Short-term effects of ambient particles on cardiovascular and respiratory mortality. *Epidemiology*. 2006; 17(2):230–233. DOI:10.1097/01.ede.0000199439.57655.6b.
8. **Zanobetti A., Franklin M., Koutrakis P., Schwartz J.** Fine particulate air pollution and its components in association with cause-specific emergency admissions. *Environmental Health*. 2009; 8(1):1–12. DOI:10.1186/1476-069X-8-58.
9. **Dominici F., Peng R.D., Bell M.L., Pham L., McDermott A., Zeger S.L., Samet J.M.** Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases. *The Journal of the American Medical Association*. 2006; 295(10):1127–1134. DOI:10.1001/jama.295.10.1127.
10. **Becker A.A., Agaev T.B.** *Okhrana i kontrol' zagryazneniya prirodnoy sredy* [Protection and control of pollution of the natural environment]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1989: 287. (In Russ.)
11. **Eremkin A.I., Kvashnin I.M., Yunkerov Yu.I.** *Normirovanie vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu* [Regulation of emissions of pollutants into the atmosphere]. Moscow: Izdatel'stvo ASV; 2000: 170. (In Russ.)
12. **Matveev L.T.** *Kurs obshchey meteorologii. Fizika atmosfery* [The course of general meteorology. Physics of the atmosphere]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1984: 752. (In Russ.)
13. **Bezuglaya E.Yu., Rastorgueva G.P., Smirnova I.V.** *Chem dyshit promyshlennyy gorod* [What an industrial city breathes]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1991: 251. (In Russ.)
14. **Zuev V.E., Krasnenko N.P., Fedorov V.A., Fursov M.G.** Acoustic sounding for the boundary layer of the atmosphere. *Doclady USSR Academy of Sciences*. 1981; 257(5):1092–1096. Available at: <http://mi.mathnet.ru/dan44384> (accessed 05.05.2022). (In Russ.)
15. The Global Forecast System (GFS) documentation. Available at: [https://nomads.ncep.noaa.gov/txt\\_descriptions/GFS\\_doc.shtml](https://nomads.ncep.noaa.gov/txt_descriptions/GFS_doc.shtml) (accessed 05.05.2022).
16. **Lin C., Labzovskii L., Mak H., Fung J., Lau A., Kenea S., Bilal M., Hey J., Lu X., Ma J.** Observation of PM<sub>2.5</sub> using a combination of satellite remote sensing and low-cost sensor network in Siberian urban areas with limited reference monitoring. *Atmospheric Environment*. 2020; (227):117410. DOI:10.1016/j.atmosenv.2020.117410.
17. Wgrib2 utility to read and write grib2 files. Available at: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/wgrib2> (accessed 05.05.2022).
18. **You W., Zang Z., Zang L., Li Z., Chen D., Zhang G.** Estimating ground-level PM<sub>10</sub> concentration in Northwestern China using geographically weighted regression based on satellite AOD combined with CALIPSO and MODIS fire count. *Remote Sensing of Environment*. 2015; (168):276–285. DOI:10.1016/j.rse.2015.07.020.
19. **Péré J.C., Pont V., Mallet M., Bessagnet B.** Mapping of PM<sub>10</sub> surface concentrations derived from satellite observations of aerosol optical thickness over south-eastern France. *Atmospheric Research*. 2009; 91(1):1–8. DOI:10.1016/j.atmosres.2008.05.001.
20. **Lin C., Li Y., Yuan Z., Lau A., Li C., Fung J.** Using satellite remote sensing data to estimate the high-resolution distribution of ground-level PM<sub>2.5</sub>. *Remote Sensing of Environment*. 2015; (156):117–128. DOI:10.1016/j.rse.2014.09.015.