УДК 502.2.05+504.3.054

СХЕМА АЭРОЗОЛЬНОГО МОНИТОРИНГА НА УРАЛЕ: СОЧЕТАНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРИМЕСЕЙ

(материалы доклада в форме расширенной презентации)

Д. Е. Васильева [1,2], Е. С. Наговицына[1,2], В. М. Гадельшин [1,2]

[1] Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
[2] Физико-технологический институт УрФУ, г. Екатеринбург, Россия

В докладе рассматривается схема мониторинга аэрозольного загрязнения в Уральском регионе. Цель ее разработки – определение содержания атмосферного аэрозоля в произвольной точке региона, в которой проведение прямых измерений не осуществляется или не представляется возможным. В основе схемы лежит сочетание данных сети непрерывных наземных измерений и численного моделирования методом флюид-локации атмосферы (ФЛА). Благодаря построению средних полей концентрации аэрозоля по данным из нескольких пунктов мониторинга появляется возможность охарактеризовать зону контроля расчета ФЛА с наибольшим уровнем достоверности решения.

Доклад был представлен на 3-й Всероссийской конференции с международным участием «Юдахинские чтения» 27 июня 2024 года (Архангельск, Россия).

Ключевые слова: атмосферные примеси; PM2.5; аэрозольный мониторинг; методы статистики обратных траекторий; флюид-локация атмосферы.

Схема аэрозольного мониторинга на Урале: сочетание непрерывных наземных измерений и численного моделирования пространственного распределения атмосферных примесей

Д. Е. Васильева [1,2], Е. С. Наговицына [1,2], В. М. Гадельшин [1,2]

[1] Институт промышленной экологии УрО РАН

[2] УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

Автор для переписки: daria_v00@mail.ru

Слайд 1

Атмосфера Урала

- Уральской регион характеризуется большим количеством промышленных предприятий и уникальным географическим расположением, поэтому необходим постоянный контроль загрязнения;
- Институтом промышленной экологии (ИПЭ) УрО РАН ведутся наблюдения за состоянием атмосферы:
  - на внутренней территории ИПЭ (г. Екатеринбург);
  - на площадке Коуровской астрономической обсерватории (КАО) УрФУ;
  - на территории Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики (ФИЦКИА) УрО РАН, г. Архангельск.
- Воздушные массы с территории Средней Азии и Арктической зоны формируют характерный состав атмосферного аэрозоля на Урале;
- Одним из ключевых факторов загрязнения воздуха в регионе становятся лесные пожары [1].

Слайд 2

Лесные пожары 2023 г. в Уральском регионе

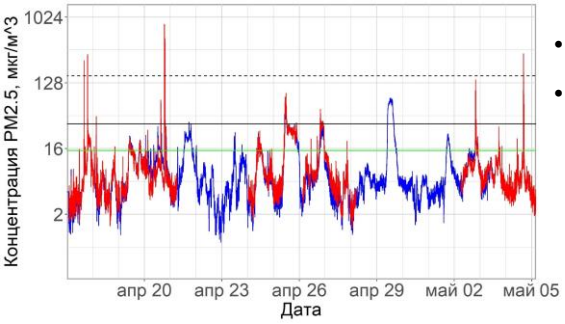


Рис. 1. Временной ход концентрации аэрозоля за период: 17.04.23 – 05.05.23

- концентрация PM2.5 по данным оптических сенсоров;
- концентрация PM2.5 по данным ДАС 2702-М;
- разовая ПДК за 20 мин, российский норматив [3];
- среднесуточная ПДК, российский норматив [3];
- среднесуточная концентрация по ГРКВ ВОЗ [4].

- Множество очагов горения в окрестностях Екатеринбурга [2];
- Кратное превышение концентрации аэрозоля PM2.5 над установленными санитарными нормами качества воздуха.

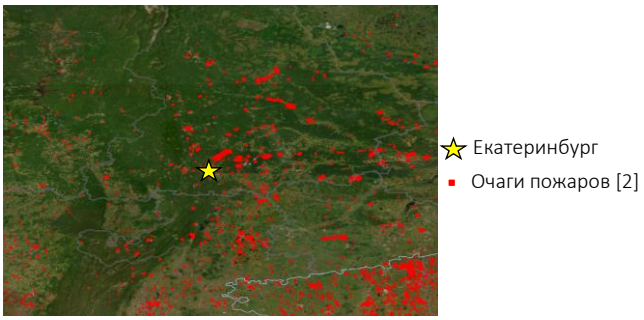


Рис. 2. Карта очагов пожаров за период 17.04.23 – 05.05.23

Слайд 3

Цель работы

Адаптация и усовершенствование имеющихся в распоряжении лаборатории методов моделирования и средств измерения аэрозольной концентрации для:

- построения карты распределения атмосферных примесей по территории Уральского региона;
- идентификации источников эмиссии аэрозольных частиц в атмосферу (очаги лесных пожаров).

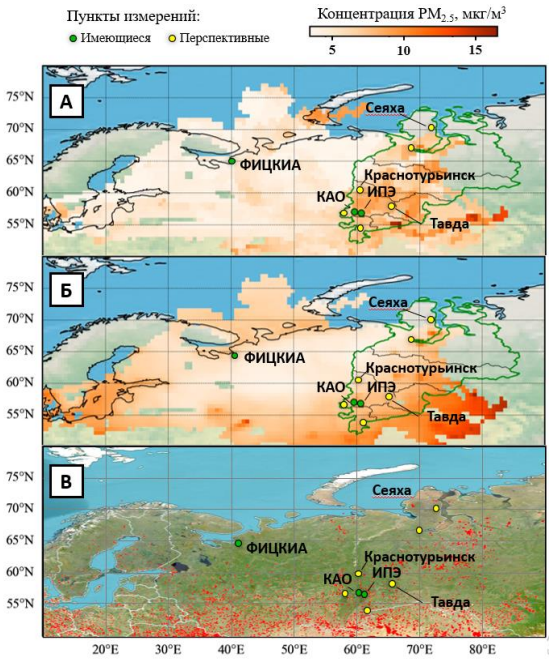


Рис. 3. Пример расчета средних полей концентрации аэрозоля PM2.5 по данным из точки измерений КАО за лето 2019 г. [5]

Слайд 4

Оптический аэрозольный сенсор Panasonic PM2.5

Используется в комплексе мониторинга аэрозольного загрязнения Институтом промышленной экологии для измерения массовой концентрации (мкг/м^3) аэрозольных микрочастиц размером от 0,3 до 2,5 мкм с верхним пределом измерения 600 мкг/м^3 [6].

Рис. 4. Внешний вид сенсора Panasonic PM2.5

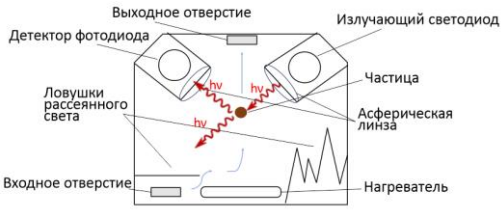


Рис. 5. Принцип работы сенсора Panasonic PM2.5

Для получения корректных данных проводится регулярная (ежегодная) калибровка сенсора с результатами измерения «эталонного» прибора: диффузионного аэрозольного спектрометра (ДАС) [7], входящего в реестр средств измерений.

Слайд 5

Аэрозольный измерительный комплекс [8]

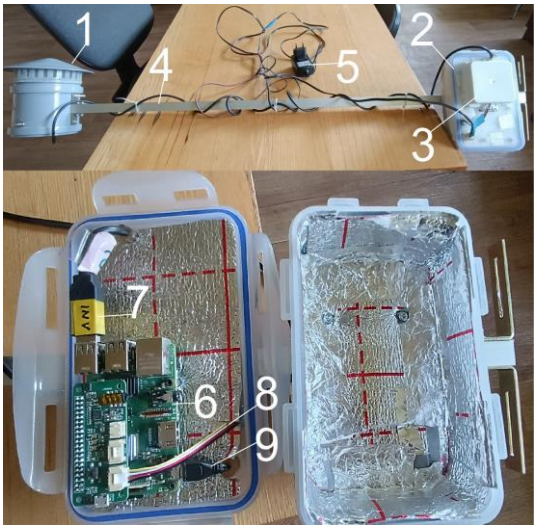


Рис. 6. Измерительный комплекс для непрерывного мониторинга аэрозоля PM2.5

1 – сенсор Panasonic PM2.5 в защитном корпусе;

2 – защитный корпус системы управления;

3 – датчик SHT31 в защитном корпусе;

4 – штанга с креплениями;

5 – питающий кабель;

6 – микрокомпьютер Raspberry Pi 3B+;

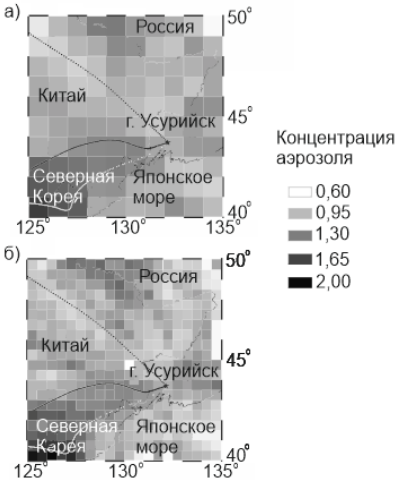
7 – подключение кабеля сенсора Panasonic PM2.5;

8 – кабель сенсора SHT31;

9 – подключение питающего кабеля.

Слайд 6

Метод флюид-локации атмосферы (ФЛА)

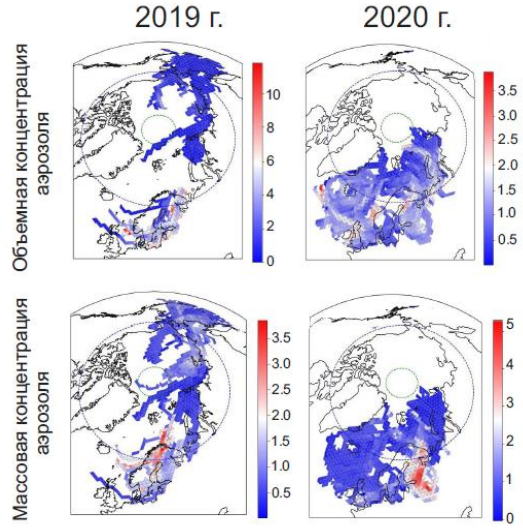


- Предназначен для расчета полей концентрации примесей [9];
- Собственный вариант развития методов статистики обратных траекторий (СОТ);
- В основе метода лежит совместный анализ результатов измерений моделируемого параметра и информации о динамике атмосферы;
- Метод ФЛА основан на решении уравнений сохранения вещества, что позволяет проводить учет реальных физико-химических процессов, которым подвержена примесь в атмосфере.

Рис. 7. Нормированное среднее поле объемной концентрации тонкодисперсного аэрозоля, рассчитанное методом ФЛА на основе фотометрических измерений за 2013–2015 гг. в Уссурийске, пространственное разрешение : а) 1° x 1°; б) 0,5° x 0,5° [10]

Слайд 7

Возможности метода ФЛА



- Расчет распределения примесей в пространстве по данным одной точки мониторинга;
- Оценка концентрации атмосферных примесей в точках, недоступных для прямых измерений;
- Определение местоположения источников эмиссии загрязняющих веществ в атмосферу;
- Возможность использования результатов измерений подвижных комплексов мониторинга атмосферного загрязнения [11].

Рис.8. Средние нормированные поля концентрации аэрозоля, рассчитанные методом ФЛА на основе данных фотометрических измерений с подвижных измерительных платформ

Слайд 8

Требования для реализации метода

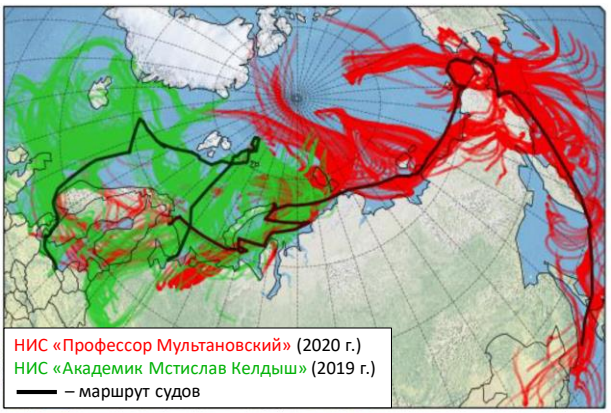
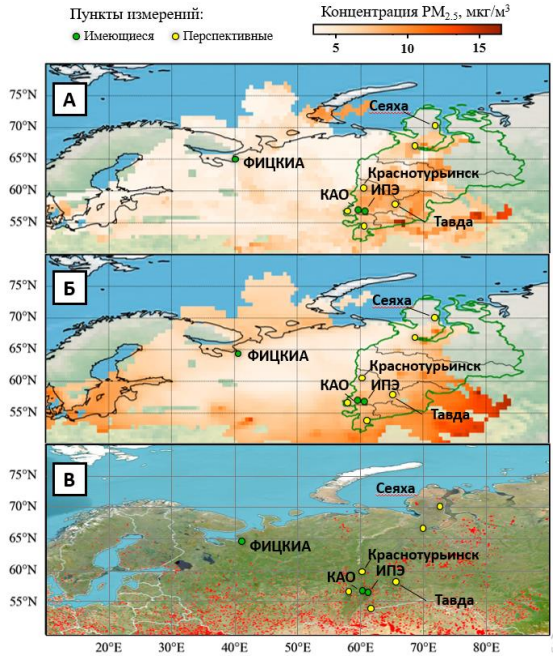


Рис. 9. Множество четырехсуточных обратных траекторий перемещения воздушных масс вдоль маршрута движения научно-исследовательских судов [11]

- Наличие хотя бы одной обратной траектории на расчетную ячейку;
- Большее количество траекторий на ячейку обеспечивает более достоверную оценку уровня концентрации;
- Достаточно большой объем данных, содержащих различные метеорологические условия.

Слайд 9

Применение ФЛА к измерениям аэрозоля на Урале



- Восстановление поля концентрации аэрозоля PM2.5 методом ФЛА по данным оптических аэрозольных сенсоров Panasonic PM2.5 в точке измерения КАО за лето 2019 г. (А), а также результаты MERRA-2 (Б) и карта очагов пожаров [2] за тот же период (В);
- Метод ФЛА (А) позволяет локализовать источники эмиссии аэрозоля PM2.5 на территории Сибири (вероятно, очаги пожаров);
- На рис. 10А можно увидеть следы обратных траекторий, приходящих в точку мониторинга.

Рис. 10. Пример расчета средних полей концентрации аэрозоля PM2.5 по данным из точки измерений КАО за лето 2019 г. [5]

Слайд 10

Влияние Арктической зоны

- 5 августа 2019 г. в Екатеринбурге зафиксирован рост концентрации PM2.5;
- Четырехдневные обратные траектории воздушных масс в этот период приходят из Арктики.

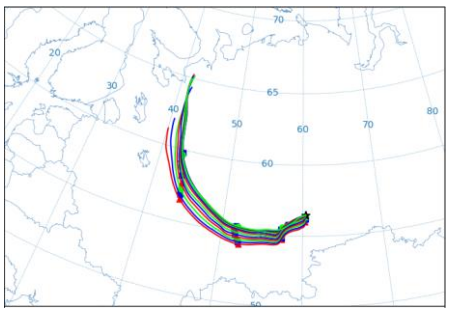


Рис. 11. Четырехсуточные обратные траектории, приходящие в точку мониторинга ИПЭ с 4 августа 18:00 по 5 августа 06:00 2019 г. [12]

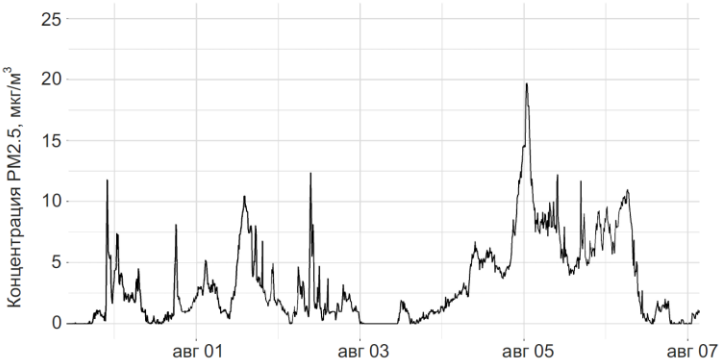


Рис. 12. Временной ход концентрации аэрозоля PM2.5 1–7 августа 2019 г. в точке мониторинга ИПЭ

Слайд 11

Предлагаемая схема мониторинга

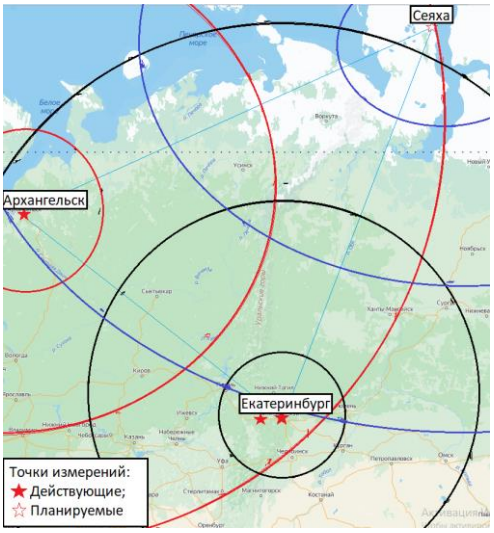


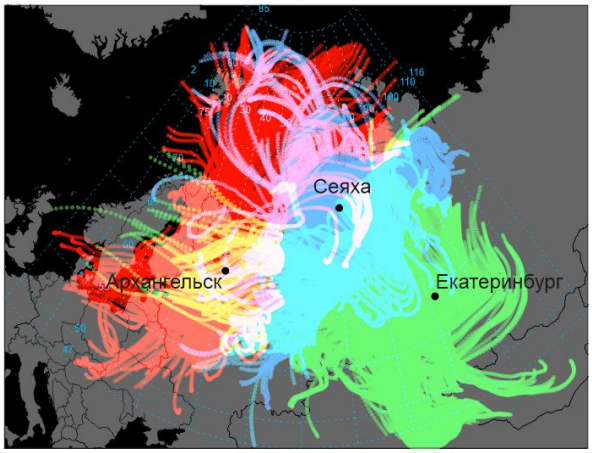
Рис. 13. Примерная схема размещения пунктов мониторинга

- Арктические воздушные массы – одна из характерных составляющих атмосферного аэрозоля на Урале [13,14];
- Использование нескольких точек мониторинга для оценки переноса примесей на ближних (до 300 км), средних (< 900 км) и дальних (< 1 500 км) расстояниях;
- Формирование зоны контроля решения ФЛА с высокой степенью достоверности;
- Развертывание временных и мобильных точек мониторинга для проверки результатов расчета.

Слайд 12

Зона контроля решения ФЛА

КАО, ФИЦКИА, Сеяха



- Образуется зона пересечения траекторий, приходящих в два и более пункта мониторинга;
- При пересечении траекторий появляется возможность кросс-валидации результатов расчета полей концентрации между пунктами мониторинга (зона контроля решения ФЛА);
- Чем больше зона пересечения, тем более достоверными будут результаты применения ФЛА;
- Размер зоны пересечения зависит от времени года.

Рис. 14. Четырехсуточные обратные траектории за октябрь 2019 г., приходящие в Архангельск (А), Сеяху (С) и Екатеринбург (Е). Зоны пересечения: желтый – АЕ, фиолетовый – АС, голубой – СЕ, белый – АЕС

Слайд 13

`

Основные преимущества и недостатки схемы

- Низкая стоимость сенсоров позволяет увеличить количество пунктов мониторинга;
- Возможность кросс-валидации результатов расчета ФЛА между пунктами, выступающими как источники первичных данных и как временные пункты проверки результатов;

+

- Зависимость от зарубежных баз спутниковых метеоданных, имеющих ограниченное пространственное разрешение (NOAA, минимальная сетка ~0,25° x 0,25°).

–

Слайд 14

Заключение

- Реализуется схема аэрозольного мониторинга на Урале по данным измерений в нескольких точках: ИПЭ, КАО и ФИЦКИА; планируется развертывание новых точек мониторинга;
- Проведена апробация метода ФЛА по данным измерений миниатюрных оптических аэрозольных сенсоров в ИПЭ, результаты согласуются с данными реанализа MERRA-2;
- В дальнейшем планируется включить в расчеты средних полей концентраций аэрозоля PM2.5 данные измерений из пункта мониторинга ФИЦКИА, а также определить зону достоверного моделирования методом ФЛА между всеми тремя пунктами аэрозольного мониторинга.

Исследование выполнено за счет субсидий Минобрнауки РФ на выполнение научной темы FUMN-2024-0004.

Слайд 15

Список литературы

1. *Шиллер, А.* В лесах Свердловской области ввели режим ЧС из-за пожаров / А. Шиллер // Российская газета: [Электронный ресурс]. – URL: https://rg.ru/2023/05/05/reg-urfo/v-lesah-sverdlovskoj-oblasti-vveli-rezhim-chs-iz-za-pozharov.html (дата обращения: 11.03.2025).
2. Firms. Fire Information for Resource Management System. – URL: https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/. (дата обращения: 01:02:2025).
3. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 года N 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”».
4. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide // World Health Organization (eds.). Bonn, Germany: World Health Organization. – 2021. – P. 300.
5. *Gadelshin, V*. Airborne particles in Yekaterinburg: An overview of ongoing research activities / V. Gadelshin // E3S Web Conf. / ed. Althausen D. [et al.] – 2024. – Vol. 575. – P. 03004.
6. Development and evaluation of a palm-sized optical $PM_{2.5}$ sensor / T. Nakayama, Y. Matsumi, K. Kawahito [et al.] // Aerosol Science and Technology. – 2018. – Vol. 52, N 1. – P. 2–12.
7. Диффузионный аэрозольный спектрометр (ДАС) модель 2702 [Электронный ресурс]. – URL: https://aeronanotechnology.com/schetchik-chastits-das-2702-m (дата обращения: 28.01.2025).
8. *Васильева, Д. Е.* Комплекс измерения концентрации PM2.5 и метеопараметров для многоточечной сети аэрозольного наблюдения в Екатеринбурге / Д. Е. Васильева, Е. А. Гуляев, Р. Имасу [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2023. – Vol. 36, N 6(413). – P. 494–501.
9. *Поддубный, В. А.* Восстановление пространственного поля концентрации атмосферного аэрозоля по данным локальных измерений: модификация метода статистики обратных траекторий / В. А. Поддубный, Е. С. Наговицына // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. – 2013. – Vol. 49, N 4. – P. 439–446.
10. *Дубинкина, Е. С.* Численная реализация метода флюид-локации атмосферы / Е. С. Дубинкина, В. А. Поддубный // Математическое моделирование. – 2018. – Т. 30, № 2. – С. 33–47.
11. Модификация метода флюид-локации атмосферы для анализа данных измерений с подвижных измерительных платформ / Е. С. Наговицына, В. А. Поддубный, А. А. Карасев [и др.] // Материалы XXVIII Междунар. симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022. – С. 243–246.
12. NOAA’s HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System / A. F. Stein, R. R. Draxler, G. D. Rolph [et al.] // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 2015. – Vol. 96. – P. 2059–2077.
13. Комплексный аэрозольный эксперимент на Среднем Урале. Часть 1. Условия проведения и результаты фотометрических измерений / В. А. Поддубный, В. В. Полькин, С. М. Сакерин [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 12. – С. 1003–1010. – DOI: 10.15372/AOO20161201.
14. Комплексный аэрозольный эксперимент на Среднем Урале. Часть 2. Характеристики аэрозоля в приземном слое атмосферы / В. А. Поддубный, В. В. Полькин, С. М. Сакерин [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 12. – С. 1011–1022. – DOI: 10.15372/AOO20161202.

Сведения об авторах:

Васильева Дарья Евгеньевна, м. н. с. Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; аспирант кафедры технической физики физико-технологического института УрФУ, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: daria_v00@mail.ru.

Наговицына Екатерина Сергеевна, к. ф.-м. н., н. с. Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; доцент кафедры технической физики физико-технологического института УрФУ, г. Екатеринбург, Россия.

Гадельшин Вадим Маратович, н. с. Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия, старший преподаватель кафедры технической физики физико-технологического института УрФУ, г. Екатеринбург, Россия.

A SCHEME OF AEROSOL MONITORING IN THE URALS: THE COMBINATION OF GROUND-BASED CONTINUOUS MEASUREMENTS AND NUMERICAL MODELING OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF ATMOSPHERIC IMPURITIES

D. E. Vasilyeva [1,2], E. S. Nagovitsyna [1,2], V. M. Gadelshin [1,2]

[1] *Institute of Industrial Ecology UB RAS, 620990, Yekaterinburg, Russia*
[2] *Institute of Physics and Technology UFU, 620002, Yekaterinburg, Russia*

A monitoring scheme of the aerosol pollution in the Ural region is considered. The purpose of the scheme development is to determine the atmospheric aerosol content at an arbitrary point in the region, where direct measurements are not performed or are not possible. The scheme is based on the combination of data from a ground-based continuous measurement network and numerical modeling by the method of fluid-location of atmosphere (FLA). Due to the calculation of average aerosol concentration fields based on data from several monitoring sites, it is possible to characterize the control zone of the FLA modeling with the highest level of solution confidence.

The talk was given at the 3rd All-Russian conference with international participants «Yudakhin readings» on 27 June, 2024 (Arkhangelsk, Russia).

Keywords: atmospheric impurities; PM2.5; aerosol monitoring network; back-trajectory statistical methods; fluid location of atmosphere.

References

1. *Shiller, A.* Emergency mode was introduced in the forests of the Sverdlovsk region due to fires / A. Shiller // Rossiyskaya Gazeta: [Electronic resource]. – URL: https://rg.ru/2023/05/05/reg-urfo/v-lesah-sverdlovskoj-oblasti-vveli-rezhim-chs-iz-za-pozharov.html (last access: 11.03.2025).
2. Firms. Fire Information for Resource Management System. – URL: https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/. (дата обращения: 01:02:2025).
3. П Resolution No. 2 of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated January 28, 2021 «On Approval of sanitary Rules and Regulations SanPiN 1.2.3685-21 “Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans”».
4. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide // World Health Organization (eds.). Bonn, Germany: World Health Organization. – 2021. – P. 300.
5. *Gadelshin, V*. Airborne particles in Yekaterinburg: An overview of ongoing research activities / V. Gadelshin // E3S Web Conf. / ed. Althausen D. [et al.] – 2024. – Vol. 575. – P. 03004.
6. Development and evaluation of a palm-sized optical $PM_{2.5}$ sensor / T. Nakayama, Y. Matsumi, K. Kawahito [et al.] // Aerosol Science and Technology. – 2018. – Vol. 52, N 1. – P. 2–12.
7. Diffusion Aerosol Spectrometer (DAS) model 2702 [Electronic resource]. – URL: https://aeronanotechnology.com/schetchik-chastits-das-2702-m (last access: 28.01.2025).
8. *Vasilyeva D. E.* A measuring system for pm2.5 concentration and meteorological parameters for a multipoint aerosol monitoring network in Yekaterinburg / D. E. Vasilyeva, E. A. Gulyaev, R. Imasu [et al.] // Atmospheric and oceanic optics. – 2023. – Vol. 36, N 6(413). – P. 494–501.
9. *Poddubny, V. A.* Retrieval of spatial field of atmospheric aerosol concentration according to data from local measurements: a modification of the method of back trajectory statistics / V. A. Poddubny, E. S. Nagovitsyna // Izvestiya, atmospheric and oceanic physics. – 2013. – Vol. 49, N 4. – P. 439–446.
10. *Dubinkina, E. S.* Numerical implementation for the fluid location of atmosphere method / E. S. Dubinkina, V. A. Poddubny // Mathematical modeling. – 2018. – Vol. 30, N 2. – C. 33–47.
11. Modification of the atmospheric fluid location method for analyzing measurement data from mobile measuring platforms / E. S. Nagovitsyna, V. A. Poddubny, A. A. Karasev [et al.] // Proceedings of the XXVIII International Symposium “Optics of the Atmosphere and Ocean. Physics of the atmosphere". Tomsk: Publishing House of the IAA SB RAS. – 2022. – P. 243–246.
12. NOAA’s HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System / A. F. Stein, R. R. Draxler, G. D. Rolph [et al.] // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 2015. – Vol. 96. – P. 2059–2077.
13. Complex aerosol experiment at the Middle Urals. Part 1. Experimental conditions and results of photometric measurements. / V. A. Poddubnyi, V. V. Polkin, S. Ì. Sakerin [et al.] // Atmospheric and oceanic optics. – 2016. – Vol. 29, N 12. – P. 1003–1010. – DOI: 10.15372/AOO20161201.
14. A comprehensive aerosol experiment in the Middle Urals. Part 2. Characteristics of aerosol in the surface layer of the atmosphere. / V. A. Poddubnyi, V. V. Polkin, S. I. Sakerin [et al.] // Atmospheric and oceanic optics. – 2016. – Vol. 29, N 12. – P. 1011–1022. – DOI: 10.15372/AOO20161202.

УДК 621.039.76

ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ АРКТИКИ ЗАТОПЛЕННЫХ И ЗАТОНУВШИХ ОБЪЕКТОВ, СОДЕРЖАЩИХ РАДИОНУКЛИДЫ

(материалы доклада в форме расширенной презентации)

С. В. Антипов[1], А. В. Григорьев[2], М. Н. Кобринский[1], И. А. Савельев[3]

[1] ИБРАЭ РАН, г. Москва, Россия
[2] ГК «Росатом», г. Москва, Россия
[3] ЗАО «ГНЦ РФ-ФЭИ», г. Обнинск, Россия

17 декабря 1958 г. от промышленности в состав ВМФ была принята ПЕРВАЯ советская атомная подводная лодка К-3 «Ленинский Комсомол». Недочетов было достаточно много. В том числе они касались атомных энергетических установок (АЭУ). При устранении неисправностей АЭУ неизбежно образовывались радиоактивные отходы (РАО). Их объемы становились настолько велики, что мощностей хранения судостроительных и судоремонтных заводов, а также береговых технических баз флота катастрофически не хватало. Поэтому было принято в то время, по всей видимости, единственно правильное решение – топить их во временных упаковках в местах, где отсутствует судоходство. Первые операции по затоплению начались в 1967 г. Завершилась такая практика только в 1991 г. В целом за этот период было проведено 80 операций. Было затоплено ~17 000 объектов, некоторые из которых содержали отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) разного уровня обогащения.

В 1982 г. результаты обследования показали, что содержание Cs-137 в южной части Баренцева моря достигало 20–40 Бк/м^3, что почти в 10 раз выше фона, обусловленного глобальными выпадениями.

Интенсивная промышленная деятельность в Арктике, развивающаяся в последние годы в результате разработки месторождений углеводородов, добычи различных минералов, нарастания транспортных потоков, развития береговой инфраструктуры и выполнения прочих видов промышленных работ, допустима только при наличии разумного долгосрочного баланса между экономическими выгодами и требованиями по защите окружающей среды.

Проблема затопленных ядерно- и радиационно опасных объектов (ЗЯРОО) существует, и она находится в центре внимания руководства страны и Госкорпорации «Росатом».

В ходе современных научных проработок по анализу различных сценариев гипотетических аварийных ситуаций был сделан вывод о том, что наличие на морском дне объектов с ОЯТ может стать источником не потенциальной, а реальной угрозы радиоактивного загрязнения. Из всех 17 000 объектов выделяют 6 наиболее опасных, но особую обеспокоенность вызывают атомные подводные лодки (АПЛ) К-27 и Б-159, которые могут стать источником радиоактивного загрязнения Баренцева, Карского, Белого морей и Северного Ледовитого океана.

АПЛ Б-159 не готовилась к затоплению, поэтому возможность выхода радиоактивных веществ за пределы корпуса реактора достаточно высока. Кроме этого, подводная лодка затонула недалеко от города Мурманска, а также на пути мореплавания и рыбного промысла. И в случае аварии местные подводные течения разнесут радиоактивные вещества не только по Баренцеву морю, но и в Белое море.

АПЛ К-27 была подготовлена к затоплению, поэтому внутри прочного корпуса были созданы дополнительные барьеры безопасности (заполнены отвердителем