

*В. Ф. Рапута^{1✉}, М. А. Запезалов², Т. В. Ярославцева^{1,3},
А. А. Леженин¹, В. А. Сурнин², А. О. Корунов²*

Особенности распределения полициклических ароматических углеводородов по территории г. Красноярска

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Научно-производственное объединение «Тайфун»,
г. Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация

³Новосибирский институт гигиены Роспотребнадзора,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: raputa@sscc.ru

Аннотация. В связи с высокими уровнями загрязнения атмосферного воздуха полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ) поиск их источников на территориях городов является актуальной задачей. С использованием результатов измерений концентраций шестнадцати компонентов ПАУ в снежном покрове г. Красноярска проведено исследование статистических связей компонентного состава в 47 точках, принадлежащих различным районам города. Установлен высокий уровень соответствия состава для пар точек, находящихся преимущественно под воздействием выбросов «Русала». Аналогичная картина имеет место для точек, расположенных в окрестностях ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2. Показано, что уровень корреляционных связей резко снижается при проведении сравнения состава ПАУ в пробах снега, отобранных в районе «Русала», с содержаниями ПАУ в пробах снега из окрестностей ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2. Установлена идентичность компонентного состава ПАУ в снеговых пробах из районов ТЭЦ-3 и «Русала», что является следствием их взаимного расположения и зимней розы ветров. Выявленная индивидуальность компонентного состава ПАУ в атмосферных выбросах «Русала» создает практические возможности контроля их поступления на территорию города.

Ключевые слова: загрязнение города, полициклические ароматические углеводороды, снежный покров, корреляционный анализ, ВЭЖХ

*V. F. Raputa^{1✉}, M. A. Zapevalov², T. V. Yaroslavtseva^{1,3},
A. A. Lezhenin¹, V. A. Surnin², A. O. Korunov²*

Features of the distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the territory of Krasnoyarsk

¹Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

²Scientific and Production Association "Typhoon", Obninsk, Russian Federation

³Novosibirsk Institute of Hygiene of Rospotrebnadzor, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: raputa@sscc.ru

Abstract. Due to high levels of air pollution with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), the search for their sources in urban areas is a pressing issue. Using the results of measuring the concentrations of sixteen PAH components in the snow cover of Krasnoyarsk, a study was conducted of the statistical relationships between the component composition at 47 points in different areas of the city. A high level of compositional correspondence was established for pairs of points that are

primarily affected by emissions from Rusal. A similar picture is observed for points located in the vicinity of TPP-1 and TPP-2. It was shown that the level of correlations sharply decreases when comparing the PAH composition in snow samples taken in the Rusal area with the PAH contents in snow samples from the vicinity of TPP-1 and TPP-2. The identity of the component composition of PAHs in snow samples from the vicinity of TPP-3 and Rusal has been established, which is a consequence of their mutual location and the winter wind rose. The revealed individuality of the component composition of PAHs in the atmospheric emissions of Rusal creates practical opportunities for monitoring their entry into the city.

Keywords: urban pollution, polycyclic aromatic hydrocarbons, snow cover, correlation analysis, HPLC

Введение

Существенный вклад в загрязнение атмосферного воздуха городов Сибири вносят полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Проблема загрязнения ПАУ наиболее остро проявляется в Красноярске, Кемерово, Новокузнецке, Иркутске, Братске, Чите, Улан-Удэ [1-4]. Максимальные концентрации

ПАУ фиксируются в холодные месяцы [5], что объясняется повышенными объёмами сжигания органического топлива на тепловых станциях и автономных источниках теплоснабжения. Особую роль в этих процессах играют климатические условия [6].

К основным источникам выбросов ПАУ в атмосферу относятся металлургические, химические предприятия, объекты теплоэнергетического комплекса, автотранспорт [7, 8]. Для идентификации источников загрязнения необходимо определение компонентного состава ПАУ [9]. Измеряемые концентрации ПАУ являются результатом суммации разнонаправленных процессов, включающих в себя, наряду с прямой эмиссией, фотохимическую трансформацию, сухое и влажное осаждение, биохимическое разложение. Для определения компонентного состава ПАУ в атмосферном воздухе, природных планшетах необходимо применение современных методов анализа с высокой селективностью и чувствительностью. Одним из них является метод высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с флуориметрическим детектированием [10].

Эффективным методом, позволяющим получить информацию о выпадениях загрязняющих примесей из атмосферы на поверхность земли, является исследование почвенного, растительного и снежного покрова [11-13]. При планировании сети мониторинга следует учитывать сведения об имеющихся источниках загрязнения атмосферного воздуха, характеристиках примесей, метеорологических условиях, результатах предыдущих наблюдений. Конечными целями исследования является: определение основных загрязняющих веществ, пространственно-временная динамика их распространения, оценивание потоков этих веществ на подстилающую поверхность [14-16].

Снеговой покров города является хорошим индикатором антропогенных выбросов ПАУ [14, 17-20]. Содержание ПАУ в снеге к концу зимнего сезона становится максимальным, что позволяет с высокой точностью находить их концентрации. Особое значение эти исследования приобретают при изучении длитель-

ного загрязнения территорий [21, 22]. Следует также отметить, что поля концентраций примесей в снежном покрове зависят от мощности эмиссии, продолжительности периода накопления, параметров источников, метеорологических условий.

Объекты и материалы исследования

По географическим условиям территория г. Красноярска расположена в зоне высокого потенциала загрязнения атмосферы. Возникновению экстремальных концентраций ПАУ в холодный период года способствует частая повторяемость неблагоприятных метеоусловий, которые характеризуются слабыми ветрами, штилями, инверсиями температуры, испарениями с р. Енисея [23].

Объектом исследования служил снеговой покров г. Красноярска в окрестностях ТЭЦ-1, ТЭЦ-2, ТЭЦ-3 и «Русала». Основными компонентами их выбросов являются ПАУ. ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 находятся в пределах городской застройки. ТЭЦ-3 расположена в северо-восточной части города и непосредственно попадает в зону влияния доминирующих выбросов ПАУ от «Русала». Схемы отбора снеговых проб в окрестностях рассматриваемых источников представлены на рис. 1 и рис. 2.

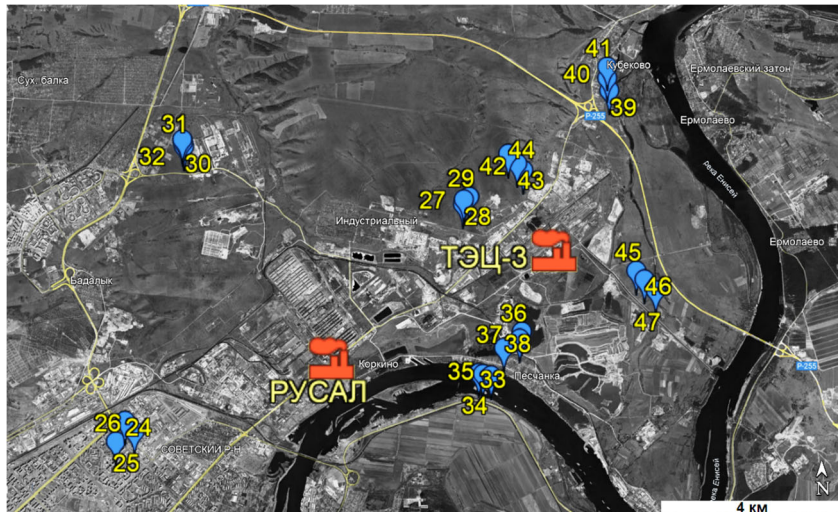


Рис. 1. Схемы отбора проб снега в окрестностях ОАО «Русал» и ТЭЦ-3

Согласно рис. 1 отбор проб снега по отношению к промплощадкам «Русала» и ТЭЦ-3 проводился по четырём направлениям. На каждом направлении находилась подгруппа из трёх достаточно близкорасположенных точек, что позволяет проводить дополнительный контроль компонентного состава ПАУ в снеговых пробах. Удаления от промплощадок точек отбора проб составляет от 1 до 5

км. Отбор проб снега был проведён в конце зимнего сезона 2018 г. сотрудниками Среднесибирского УГМС.

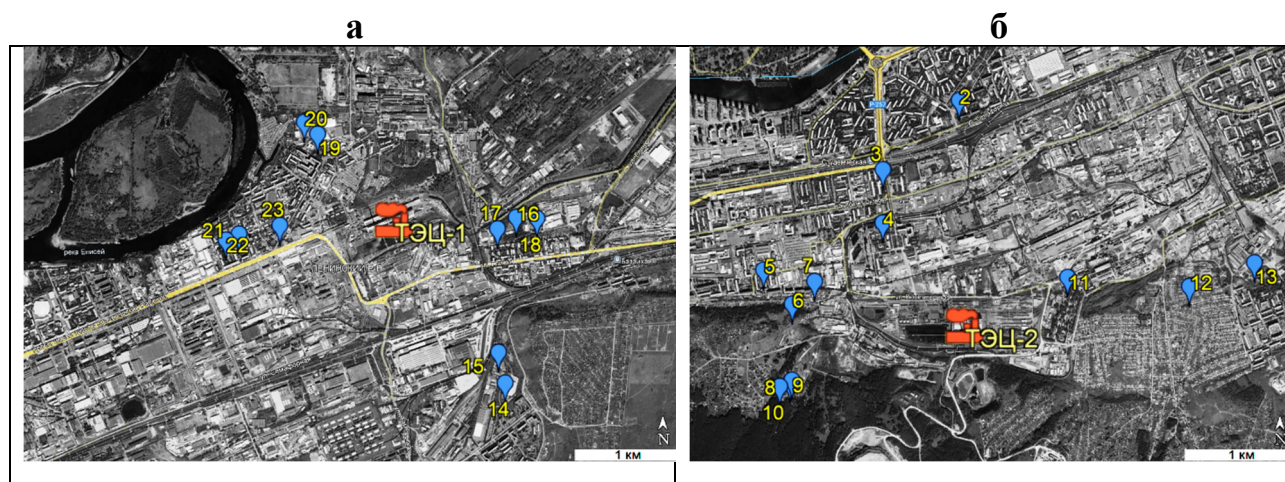


Рис. 2. Схемы отбора проб снега в окрестностях ТЭЦ-1 (а) и ТЭЦ-2 (б)

Рис. 2 показывает, что в случае ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 точки на маршрутах пробоотбора в большей степени рассредоточены между собой. Это позволяет оценить динамику изменения концентраций ПАУ по мере удаления от труб рассматриваемых ТЭЦ.

Химический анализ снеговых проб выполнялся в аккредитованной лаборатории Института проблем мониторинга ФГБУ «НПО «Тайфун» (г. Обнинск). Используемая методика обеспечивает выполнение измерений с погрешностью, не более 25% [15]. В пробах были определены содержания следующих 16 компонентов ПАУ: нафталина, аценафтилена, аценафтена, флуорена, фенантрена, антрацена, флуорантена, пирена, бенз(а)антрацена, хризена, бенз(б)флуорантена, бенз(к)флуорантена, бенз(а)пирена, дибенз(а, h)антрацена, бенз(g, h, i)перилена, инден[1,2,3-с, d]пирена. Они содержат от 2-х до 6-ти конденсированных ароматических кольца и могут находиться, как в растворе, так и на аэрозолях.

Результаты и обсуждения

Из анализа результатов мониторинга снежного покрова г. Красноярска следует наличие значительных концентраций ПАУ на территории города. В первую очередь, это относится к зоне интенсивного воздействия атмосферных выбросов ПАУ от «Русала», которая расположена севернее промплощадки завода. Тем не менее рис. 3а и рис. 3б показывают высокий уровень корреляционных связей компонентного состава между точками наблюдений из этой зоны.

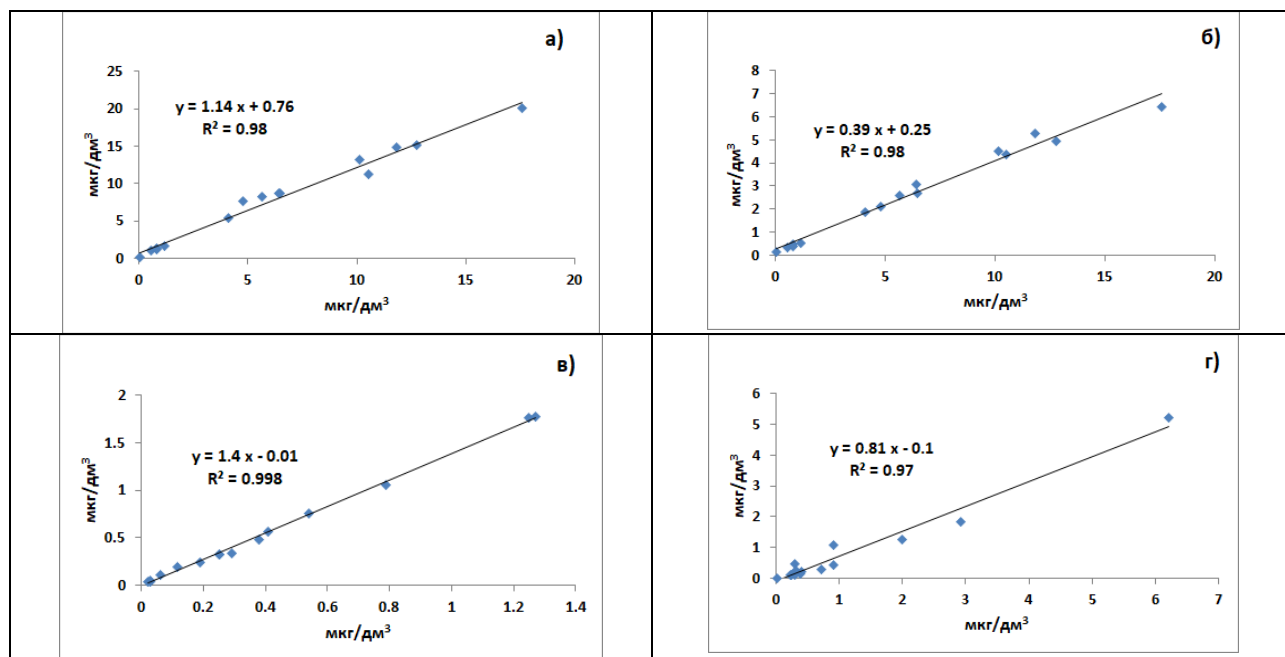


Рис. 3. Попарные корреляционные зависимости между компонентами ПАУ, измеренных в точках 29 и 26 (а), 29 и 39 (б), 2 и 3 (в), 11 и 12 (г)

На рис. 3в и 3г представлены результаты корреляционного анализа данных измерений компонентов ПАУ в точках пробоотбора снега из окрестности ТЭЦ-2. Имеет место также высокий уровень согласия. Особо следует обратить внимание на рис. 3в, где наблюдается практически полное попадание измеренных значений концентраций компонентов ПАУ на линию регрессии и что подчёркивает качество проведённых экспериментальных и химико-аналитических исследований. Результаты, приведённые на рис. 3, показывают наличие в рассматриваемых случаях доминирующих источников ПАУ, которые обеспечивают высокий уровень корреляционных связей.

На рис. 4 представлены корреляционные связи компонентного состава ПАУ между парами точек наблюдений, расположенных на значительных удалениях друг от друга.

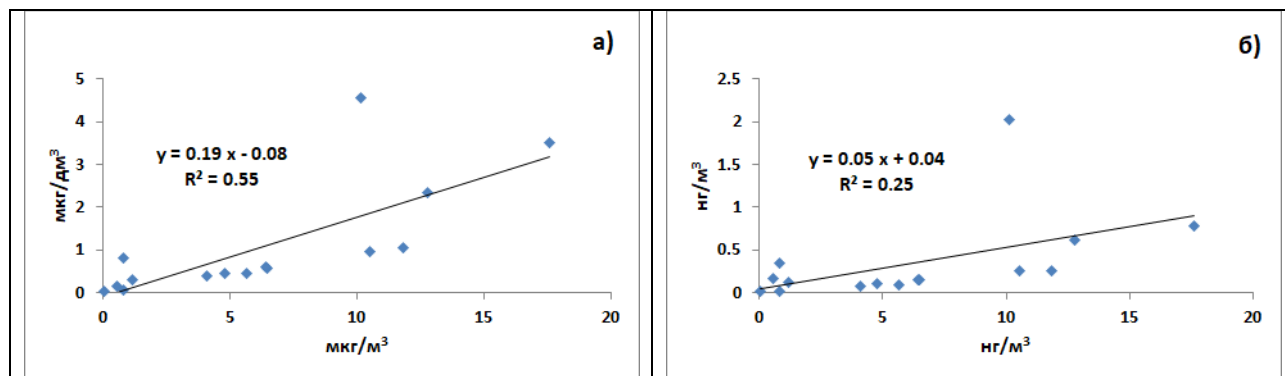


Рис. 4. Попарные корреляционные зависимости между компонентами ПАУ между точками 29 и 20 (а), 29 и 9 (б)

Эти точки находятся под воздействием выбросов существенно разных источников. Из анализа рис. 4а следует наличие значительных различий компонентного состава выбросов ПАУ с промплощадки «Русала» и ТЭЦ-1. Аналогичный результат был получен при сравнении концентраций ПАУ в окрестностях ТЭЦ-2 и промплощадки «Русал». Сравнение же компонентного состава в окрестностях ТЭЦ-3 и «Русала» значимых различий не выявило, что объясняется доминирующими объёмами выбросов ПАУ от алюминиевого завода и их вкладом в формирование суммарных полей концентраций по сравнению с выбросами рассматриваемой ТЭЦ. Полученные результаты указывают на возможность использования информации о различиях в компонентном составе выбросов ПАУ с промплощадки «Русала» для оценки их влияния на атмосферу города.

Заключение

Проведено исследование корреляционных связей между компонентами ПАУ в снежном покрове г. Красноярска. Выполненный сравнительный анализ показал высокий уровень согласия для пар точек, находящихся исключительно под воздействием выбросов «Русала» или ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2. Если же одна из точек находится под доминирующим влиянием выбросов «Русала», а другая расположена в окрестности ТЭЦ-1 или ТЭЦ-2, то уровень связей существенно снижается, что указывает на значительные различия компонентного состава выбросов ПАУ от рассматриваемых источников. Установленная индивидуальность компонентного состава выбросов ПАУ от промплощадки «Русала» создает возможности для оценивания вклада выбросов данного предприятия в загрязнение территорий г. Красноярска.

Характерная для Красноярска зимняя роза ветров обеспечивает преобладающий вынос ПАУ в северо-восточном секторе, что указывает на относительно небольшой вклад выбросов «Русала» в загрязнение основной территории города в холодный период года. Наблюдения, проведенные в окрестностях ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2, подтверждают вышеизложенное утверждение. Корреляционный анализ данных наблюдений снегового покрова в окрестностях ТЭЦ-3 показал идентичность компонентного состава с выбросами «Русала», что объясняется особенностями взаимного расположения этих источников.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН FWNM-2025-0003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безуглая Э. Ю., Смирнова И. В. Воздух городов и его изменения. – СПб.: Астерион, 2008. – 253 с.
2. Ануфриева А. Ф., Загайнова М. С., Ивлева Т. П., Любушкина Т. М., Смирнова И. В. Ежегодник состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2016 г. – Санкт-Петербург: ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова», 2017. – 228 с.
3. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2023 году». – Красноярск, 2024. [Электронный ресурс]. URL: http://www.mpr.krskstate.ru/dat/bin/art_attach/28086_2024.06.28.pdf (дата обращения: 10.03.2025).
4. Доклад об экологической ситуации в Забайкальском крае за 2023 год [Электронный ресурс]. URL: <https://minpriir.75.ru/deyatel-nost/ohrana-okruzhayuschey-sredy/ekologicheskaya-situaciya-v-zabaykal-skom-krae> (дата обращения: 10.03.2025).

5. Безуглая Э. Ю., Расторгуева Г. П., Смирнова И. В. Чем дышит промышленный город. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 256 с.
6. Селегей Т. С. Формирование уровня загрязнения атмосферного воздуха в городах Сибири. – Новосибирск: Наука, 2005. – 347 с.
7. Суздорф А. Р., Морозов С. В., Кузубова Л. И., Аншиц Н. Н., Аншиц А. Г. Полициклические ароматические углеводороды в окружающей среде: источники, профили и маршруты превращения // Химия в интересах устойчивого развития. – 1994. – Т. 2. – № 2–3. – С. 511–540.
8. Халиков И. С. Идентификация источников загрязнения объектов природной среды полициклическими ароматическими углеводородами с использованием молекулярных соотношений // Экологическая химия. – 2018. – Т. 27. – № 2. – С. 76–85.
9. Халиков И. С. Оценка возможности диагностики источников загрязнения атмосферного воздуха полициклическими ароматическими углеводородами по их компонентному составу. – Тамбов: ООО "Консалтинговая компания Юком", 2024. – 80 с.
10. Басова Е. М., Иванов В. М. Современное состояние высокоэффективной жидкостной хроматографии полициклических ароматических углеводородов // Вестник Московского университета. – Серия 2: Химия. – 2011. – Т. 52. – № 3. – С. 163–174.
11. Семенов М. Ю., Снытко В. А., Маринайте И. И. Новый метод оценки вкладов источников полициклических ароматических углеводородов в загрязнение объектов природной среды // Доклады Академии наук. – 2015. – Т. 463. – № 1. – С. 94.
12. Белозерцева И. А. Мониторинг загрязнения окружающей среды в зоне воздействия ИркаЗа // Вода: химия и экология. – 2013. – № 10. – С. 33–38.
13. Жидкин А. П., Геннадиев А. Н., Лобанов А. А. Индикационное значение соотношений индивидуальных полициклических ароматических углеводородов в системе снег - почва при разных условиях землепользования // Вестник Московского университета. – Серия 5: География. – 2017. – № 5. – С. 24–32.
14. Василенко В. Н., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 182 с.
15. Хаустов А. П., Редина М. М., Геохимические маркеры на основе соотношений концентраций полициклических ароматических углеводородов в компонентах окружающей среды // Вода: химия и экология. – 2014. – № 12. – С. 98–107.
16. Ровинский Ф. Я., Теплицкая Т. А., Алексеева Т. А. Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 224 С.
17. Прокачева В. Г., Усачев В. Ф. Снежный покров как индикатор кумулятивного техногенного загрязнения в сфере влияния городов и дорог // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 3. – С. 94–106.
18. Журба О. М., Меринов А. В., Шаяхметов С. Ф., Алексеенко А. Н. Гигиеническая оценка загрязнения тяжёлыми металлами и органическими соединениями снежного покрова многопрофильного индустриального города // Гигиена и санитария. – 2024. – Т. 103. – № 9. – С. 940–946.
19. Тентюков М. П., Габов Д. Н., Симоненков Д. В., Язиков Е. Г. Загрязнение поверхности снега полициклическими ароматическими углеводородами при образовании изморози // Лёд и снег. – 2019. – Т. 59. – № 4. – С. 483–493.
20. Sun L., Ai X., Yao X., An Q., Liu X., Yakovleva E., Zhang L., Sun H., Zhang K., Zang S. Relationship between atmospheric pollution and polycyclic aromatic hydrocarbons in fresh snow during heavy pollution episodes in a cold city, northeast China // Ecotoxicol. Environ. Saf. – 2023. – V. 260. – Article No. 115091.
21. Яковлева Е. В., Василевич М. И., Габов Д. Н. Полициклические ароматические углеводороды в снежном покрове заповедных территорий Республики Коми // Теоретическая и прикладная экология. – 2024. – № 3. – С. 72–81.
22. Raputa V. F., Kokovkin V. V., Morozov S. V., Yaroslavl'tseva T. V. Organic Carbon in the City Territories of the South of West Siberia // Химия в интересах устойчивого развития. – 2016. – Т. 24. – № 4. – С. 483–489.
23. Климат Красноярска / Под ред. Ц. А. Швер, А. С. Герасимовой. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 229 с.

© В. Ф. Репута, М. А. Запечалов, Т. В. Ярославцева,
А. А. Леженин, В. А. Сурнин, А. О. Корунев, 2025