

Периодичность выхода журнала с 2021 года **2 номера в год**
(до 2021 года журнал выходил 1 раз в год).

В журнале «**Антропогенная трансформация природной среды**» представлены оригинальные и обзорные статьи, краткие сообщения по геоэкологическим проблемам, научные результаты исследований взаимодействия человека и природы, соответствующие трем тематическим разделам:

- **Трансформация природной среды ИЛИ Pollution** (по классификации Scopus)
- **Сохранение природной среды ИЛИ Nature and Landscape Conservation** (по классификации Scopus)
- **Палеоэкология и Палеогеография ИЛИ Earth-Surface Processes** (по классификации Scopus)

Предпочтение отдается статьям на геоэкологической, географической, биогеоценотической, биогеохимической, биологической основе.

Журнал представляет интерес для исследовательских институтов; учебных заведений, дающих высшее профессиональное образование и осуществляющих научную деятельность; научных библиотек и ученых, работающих в области геоэкологии, экологии, сохранения и восстановления природы.

Журнал индексируется в системах:

Российский индекс научного цитирования

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Сергей Алексеевич Бузмаков зав. кафедрой биогеоценологии и охраны природы Пермского государственного национального исследовательского университета (Россия), профессор, доктор географических наук

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- | | |
|--------------------------------|---|
| Валентина Сергеевна Артамонова | ведущий научный сотрудник Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Россия), доктор биологических наук; |
| Славомир Бакир | декан факультета лесного хозяйства Белостокского технологического университета (Польша), доктор технических наук; |
| Александр Николаевич Бармин | декан геолого-географического факультета; зав. кафедрой экологии, природопользования, землеустройства и безопасности жизнедеятельности Астраханского государственного университета (Россия), профессор, доктор географических наук; |
| Дарья Олеговна Егорова | старший научный сотрудник лаборатории молекулярной микробиологии и биотехнологии Института экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН (Россия), доцент, кандидат биологических наук; |
| Ханс-Холгер Листе | научный сотрудник Институт им. Юлиуса Кюна, Федеральный исследовательский центр культурных растений (Германия), доктор сельскохозяйственных наук; |
| Павел Юрьевич Санников | доцент кафедры биогеоценологии и охраны природы Пермского государственного национального исследовательского университета (Россия), кандидат географических наук; |
| Андрей Владимирович Соромотин | директор научно-исследовательского института экологии и рационального использования природных ресурсов при Тюменском государственном университете (Россия), профессор, доктор биологических наук; |
| Юрий Александрович Федоров | зав. кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет (Россия), профессор, доктор географических наук; |
| Адриано Фиоруччи | профессор кафедры окружающей среды, землепользования и инженерной инфраструктуры Политехнического университета г. Турин (Италия), доктор геолого-минералогических наук; |
| Андрей Николаевич Шихов | доцент кафедры картографии и геоинформатики Пермского государственного национального исследовательского университета (Россия), кандидат географических наук; |
| Людмила Сергеевна Шумиловских | научный сотрудник кафедры палинологии и динамики климата Гёттингенского университета им. Георга-Августа (Германия), кандидат биологических наук. |

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Адрес учредителя: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

Адрес редакции: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, географический факультет, кафедра биогеоценологии и охраны природы

© Пермский государственный национальный
исследовательский университет, 2022



The frequency of the journal's publication from 2021 is **2 issues per year** (until 2021 the journal was published once a year).

The journal «**Anthropogenic Transformation of Nature**» presents original papers, review papers and short communications articles addressed to geoeological problems, scientific questions of interaction of Man and Nature. All material in the Journal should correspond to three thematic sections:

- **Nature and Landscape Conservation** (Scopus classification)
- **Pollution** (Scopus classification)
- **Earth-Surface Processes** (Scopus classification)

Articles on a geoeological, geographical, ecosystem, biogeochemical, biological basis are preferred.

The journal is of interest to research institutes; educational institutions providing higher professional education and carrying out scientific activities; scientific libraries and scientists working in the field of geoeology, ecology, conservation and restoration of nature.

The journal is indexed in systems:

Russian Science Citation Index

EDITOR-IN-CHIEF

Sergei A. Buzmakov Chair of Department of Biogeocenology and Nature Protection in Perm State University (Russia),
Doctor of Sciences in Geography.

EDITORIAL BOARD

- | | |
|---------------------------|--|
| Valentina S. Artamonova | Leading Scientific Researcher, Institute of Soil Science and Agrochemistry (Siberian Branch of Russian Academy of Sciences – Russia), Doctor of Sciences in Biology. |
| Slawomir Bakier | Dean of the Faculty of Forestry, Bialystok University of Technology (Poland), Doctor of Sciences in Technology. |
| Alexander N. Barmin | Dean of the Faculty of Geology & Geography; Chair of Ecology, Nature & Land Management & Safe Vital Activities Department, Astrakhan State University (Russia), Doctor of Sciences in Geography. |
| Darya O. Egorova | Senior Scientific Researcher of Laboratory of Molecular Microbiology and Biotechnology, Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms (Ural Branch of Russian Academy of Sciences – Russia), PhD in Biology. |
| Hans-Holger Liste | Research Scientist of Julius Kühn-Institut, Federal Research Centre for Cultivated Plants (Germany), Doctor of Sciences in Agriculture. |
| Pavel Yu. Sannikov | Associate Professor, Department of Biogeocenology and Nature Protection in Perm State University (Russia), PhD in Geography. |
| Andrey V. Soromotin | Director of the Research Institute of Ecology and Natural Resource Management of the University of Tyumen, Doctor of Sciences in Biology. |
| Yuri A. Fedorov | Chair of Department of Physical Geography, Ecology and Nature Conservation, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University (Russia), Doctor of Sciences in Geography. |
| Adriano Fiorucci | Professor, Department of Environment, Land and Infrastructure Engineering, Polytechnic of Turin (Italy), Doctor of Sciences in Geology. |
| Andrey N. Shikhov | Associate Professor, Department of Cartography and Geoinformatics in Perm State University (Russia), PhD in Geography. |
| Lyudmila S. Shumilovskikh | Scientific Researcher of Department of Palynology and Climate Dynamics in Georg-August-University of Göttingen (Germany), PhD in Biology. |

Founder: Perm State University

Founder address: 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

Editorial office address: 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia,

Faculty of Geography, Department of Biogeocenology and Nature Protection

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. СОХРАНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Бузмаков С.А., Переведенцева Л.Г., Бердинских С.Ю., Боталов В.С., Романов А.В., Гатина Е.Л., Шестаков И.Е., Зайцев А.Г. Почвенное и биологическое разнообразие природной среды в районе горы Шудья-Пендыш: свежие и влажные лесорастительные условия	6
---	---

РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Хаустов А.П., Редина М.М. Структурная энтропия как мера фракционирования массопотоков в экосистемах в условиях транспортного прессинга	16
Емельянов М.А., Ключихина О.С. Порядок расчета технологических показателей выбросов загрязняющих веществ при разработке заявки на получение комплексного экологического разрешения.....	39
Беляева П.Г. Состав и структура фитопланктона водных объектов с экстремальными условиями (Пермский край, Россия)	53
Федоров Ю.А., Кузнецов А.Н., Дмитрик Л.Ю., Кузнецова Е.В., Бэллинджер О.Ю. Особенности распределения содержания нефтепродуктов в почвах, дорожной пыли и снеге по мегапрофилю в Ростовской области.....	61

CONTENTS**SECTION 1. NATURE AND LANDSCAPE CONSERVATION**

- Buzmakov S., Perevedentseva L., Berdinskikh S., Botalov V., Romanov A., Gatina E., Shestakov I., Zaitsev A.** Soil and biological diversity of the natural environment in the area of mount Shudya-Pendysh: fresh and moist forest growing conditions6

SECTION 2. POLLUTION

- Khaustov A., Redina M.** Structural entropy, as a measure of fractioning of mass-flows in ecosystems, under the influence of transport pressure16
- Emelyanov M., Klochikhina O.** Procedure for calculation of technological values of emissions with a purpose of developing for an integrated environmental permit39
- Belyaeva P.** Composition and structure of phytoplankton in water objects with extreme conditions (Perm region, Russia)53
- Fedorov Yu., Kuznetsov A., Dmitrik L., Kuznetsova E., Ballinger O.** Features of oil products content distribution in soils, road dust and snow according to the mega profile in the Rostov region61



Внешние обстоятельства заставляют бюрократов и деятелей науки заниматься обустройством внутренней инфраструктуры для научной деятельности в стране, прежде всего, для объективной оценки публикаций и их авторов. Возникла возможность организовать процесс представления исследований на основе опыта, полученного при тесном взаимодействии с мировой наукой. Российская публикационная активность страдает ведомственным подходом, доведением хороших идей, например с самоцитированием, до иступленного идиотизма, авторы склонны к обсуждению проблем прошлого века, рецензенты часто необоснованно категоричны в своих оценках. Для преодоления этих трудностей необходимо формировать конкурентность, чтобы бюрократические преграды и предвзятость не могли существенно влиять на публикационную активность, оценку достижений исследователей. Очевидно, с этой позиции необходимо создание второго российского портала научной информации (агрегатора), научных статей с несколько иными акцентами, чем электронная библиотека eLIBRARY.RU. Возможно, с упором на технические или, наоборот, гуманитарные публикации. Сохранение только одной электронной библиотеки, только ее рейтингов неизбежно приведет к продвижению ведомственных интересов, которые будут тормозить развитие науки.

Неординарным, выдающимся событием в жизни журнала, надеюсь, станет публикация А.П. Хаустова и М.М. Рединой. Исследование основано на эмпирических данных, которые глубоко теоретически осмыслены. Авторы выпускают статью, которая, конечно, будет с этого момента жить своей самостоятельной судьбой за счет интереса к ней теоретиков и практиков от экологов и геохимиков, до физиков и философов.

Сведения об уникальных природных объектах: почвах, растениях, грибах и лесах приведены в статье об инвентаризации биоразнообразия в районе горы Шудья-Пендыш. Сохранение девственных лесов Урала сегодня стало еще более сложной проблемой, чем ранее. Смогут ли государство, научная и экологическая общественность, лесопользователи спасти природу Пармы? Вопрос остается открытым.

Сравнение сообществ фитопланктона природного и антропогенного водоема в исследовании П.Г. Беляевой дает богатую пищу для развития положений об антропогенной трансформации среды и практических рекомендаций для организации производственной деятельности при работе с искусственными водоемами. Эвтрофикация растет, энтропия антропогенных биоценозов растет. Полученные результаты позволят в ближайшем будущем выявить закономерности антропогенной трансформации сообществ планктона.

Творческий коллектив из Южного федерального университета под руководством профессора Ю.А. Федорова сообщает о проведении геоэкологических исследований на территории Ростовской области. Полевые обследования, их результаты и обсуждение распределения углеводов в регионе позволяют говорить об определенных путях антропогенного поступления нефтепродуктов в природную среду. Полученные закономерности можно распространить на многие регионы РФ и мира.

Вопросы прикладного экологического менеджмента, регулирования поступления загрязняющих веществ, через новые для РФ принципы технологического нормирования негативного воздействия обсуждают М.А. Емельянов и О.С. Ключихина. Здесь предложен порядок расчета технологических показателей выбросов загрязняющих веществ предприятия при разработке документов для комплексного экологического разрешения. Как показывает опыт РФ, применение санитарно-гигиенических норм и правил не дало существенных положительных результатов в обеспечении благоприятной среды обитания для человека. Технологический подход, который появился примерно в то же время, что и санитарно-гигиенический, как показывает опыт других стран, также не обеспечивает высокоэффективного конечного результата. Но, может быть, их сочетание принесет большой успех.

Главный редактор С.А. Бузмаков

РАЗДЕЛ 1. СОХРАНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Оригинальная научная (исследовательская) статья

УДК 502.211 2

<https://doi.org/10.17072/2410-8553-2022-2-6-15>

Почвенное и биологическое разнообразие природной среды в районе горы Шудья-Пендыш: свежие и влажные лесорастительные условия

Сергей Алексеевич Бузмаков¹, Лидия Григорьевна Переведенцева², Светлана Юрьевна Бердинских³, Виталий Сергеевич Боталов⁴, Александр Валериевич Романов⁵, Евгения Леонидовна Гатина⁶, Игорь Евгеньевич Шестаков⁷, Александр Григорьевич Зайцев⁸

^{1,2,3,6,7} Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

^{4,5,8} Пермский государственный аграрно-технологический университет им. акад. Д.Н. Прянишникова, Пермь, Россия

¹ lep@psu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5144-0714>

² perevperm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4633-0174>

³ swetlana4586@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2164-9100>

⁴ vitalywc@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5242-8648>

⁵ moraposh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3908-9765>

⁶ suslovael@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4684-0465>

⁷ galendil@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1695-6061>

⁸ zaial@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9701-186X>

Аннотация. Для сохранения биологического разнообразия природной среды в окрестностях горы Шудья-Пендыш территория заслуживает статуса особо охраняемой в регионе. Проведены исследования лесных экосистем в пограничной зоне малонарушенных лесных территорий (МЛТ) Пермского края (окрестности горы Шудья-Пендыш, Красновишерский городской округ). Приводятся данные 2021 г. по насаждениям, формирующимся в свежих и влажных лесорастительных условиях – ельники: мшистый, папоротниковый, нагорный и березняк кисличный (тип леса: ельник мшистый). В изучаемых сообществах, с учетом фондовых данных, выявлено 39 видов сосудистых растений, относящихся к 37 родам, 25 семействам и 3 отделам. По числу видов преобладают семейства *Rosaceae*, *Poaceae* и *Ranunculaceae*. Аналогично флоре Пермского края, установлено преобладание мезофитов (79,5 % от общего числа видов флоры). По результатам полевых исследований зафиксировано 58 видов агарикомицетов, относящихся к 27 родам, 17 семействам и 4 порядкам. Ведущими по числу видов являются семейства *Russulaceae* и *Cortinariaceae*, что характерно для лесной зоны северных широт. По трофической приуроченности большинство видов агарикомицетов относится к группе микоризообразователей (55,2 %). В исследуемых сообществах обнаружено два вида грибов, новых для Пермского края: *Suillus acidus* и *Cortinarius betulinus*. Отмечен охраняемый лишайник – *Lobaria pulmonaria*, внесенный в Красные книги Российской Федерации и Пермского края. Наибольшее сходство видового состава выявлено между ельниками: мшистым (ПП № 2) и папоротниковым (ПП № 9), как по высшим сосудистым растениям (коэффициент Жаккара ($J \times 100$): $J = 74,1$), так и по агарикомицетам ($J = 36,4$). Между остальными ценозами коэффициенты Жаккара по сосудистым растениям составили 22,2–34,4, по агарикоидным грибам – 7,5–18,9. Наиболее типичными почвами для обследованных участков являются буроземы грубогумусовые средне- и тяжелосуглинистые на элюводелювии коренных пород.

Ключевые слова: малонарушенная лесная территория, гора Шудья-Пендыш, свежие и влажные лесорастительные условия, бурозем типичный, флора сосудистых растений, агарикоидные базидиомицеты

Для цитирования: Бузмаков С.А., Переведенцева Л.Г., Бердинских С.Ю., Боталов В.С., Романов А.В., Гатина Е.Л., Шестаков И.Е., Зайцев А.Г. Почвенное и биологическое разнообразие природной среды в районе горы Шудья-Пендыш: свежие и влажные лесорастительные условия // Антропогенная трансформация природной среды. 2022. Т. 8. № 2. С. 6–15. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2022-2-6-15>

© Бузмаков С.А., Переведенцева Л.Г., Бердинских С.Ю., Боталов В.С., Романов А.В., Гатина Е.Л., Шестаков И.Е., Зайцев А.Г., 2022



SECTION 1. NATURE AND LANDSCAPE CONSERVATION

Original paper

Soil and biological diversity of the natural environment in the area of mount Shudya-Pendysh: fresh and moist forest growing conditions

Sergey A. Buzmakov¹, Lydia G. Perevedentseva², Svetlana Yu. Berdinskikh³, Vitalij S. Botalov⁴, Aleksandr V. Romanov⁵, Evgenia L. Gatina⁶, Igor E. Shestakov⁷, Aleksandr G. Zaitsev⁸

^{1,2,3,6,7} Perm State University, Perm, Russia

^{4,5,8} Perm State Agro-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia

¹ lep@psu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5144-0714>

² perevperm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4633-0174>

³ swetlana4586@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2164-9100>

⁴ vitalywc@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5242-8648>

⁵ moraposh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3908-9765>

⁶ suslovael@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4684-0465>

⁷ galendil@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1695-6061>

⁸ zaial@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9701-186X>

Abstract. To preserve the biological diversity of the natural environment in the vicinity of Mount Shudya-Pendysh, the territory deserves the status of specially protected in the region. Studies of forest ecosystems in the border zone of Intact Forest Landscapes (FSC certification) of Perm Krai (Mount Shudya-Pendysh, Krasnovishersky city district) were carried out. The data of 2021 on plantings formed in fresh and moist forest-growing conditions are given - mossy spruce, fern spruce, upland spruce and sour birch (forest type: mossy spruce). 39 species of vascular plants belonging to 37 genera, 25 families and 3 divisions were identified in the studied communities. The number of species is dominated by the families *Rosaceae*, *Poaceae* and *Ranunculaceae*. 58 species of agaricomycetes belonging to 27 genera, 17 families and 4 orders have been recorded. The *Russulaceae* and *Cortinariaceae* families predominate in the number of species. Mycorrhizal fungi predominate in trophic association (55.2%). Two species of fungi new to the Perm Region were found in the studied communities: *Suillus acidus* and *Cortinarius betulinus*. A protected lichen – *Lobaria pulmonaria*, listed in the Red Books of the Russian Federation and Perm Krai, has been noted. The greatest similarity of species composition was revealed between mossy spruce and fern spruce, both for plants (Jacquard coefficient ($J \times 100$): $J = 74.1$) and for agaricomycetes ($J = 36.4$). The most typical soils for the surveyed sites are coarse-humus medium- and heavy-loamy brown soils on the eluvium of bedrock.

Key words: Intact Forest Landscapes, mount Shudya-Pendysh, fresh and moist forest conditions, typical brown soil, flora of vascular plants, agaricoid basidiomycetes

For citation: Buzmakov, S., Perevedentseva, L., Berdinskikh, S., Botalov, V., Romanov, A., Gatina, E., Shestakov, I., Zaitsev, A., 2022. Soil and biological diversity of the natural environment in the area of mount Shudya-Pendysh: fresh and moist forest growing conditions. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 8(2). pp. 6–15. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2022-2-6-15> (in Russian)

Введение

Развитие лесных сообществ зависит от множества факторов. Действие некоторых из них уже хорошо изучено и даже поддается математической обработке [13], действие иных факторов еще только осознается и приводится в единую систему с общепринятыми теориями развития леса [26, 27]. Но результаты уже вполне изученных явлений в природе могут расхо- диться с ожидаемыми при изменении условий суще- ствования биологических объектов, тем более таких, как лесные экосистемы, состоящие из множества взаимосвязанных компонентов [14, 29]. Даже не- большое по своим масштабам исследование может вложить в копилку знаний о лесных сообществах данные, которые позволят в дальнейшем правильно спрогнозировать развитие лесного массива и при- нять адекватное решение, направленное на сохране- ние лесов. Состояние лесных сообществ в горных условиях Западного Урала изучалось на территории заповедника «Вишерский» [2–10, 30], в ООПТ «Ба-

сеги» [10, 16, 19]. Детально были изучены почвы ООПТ «Басеги» [28].

Малонарушенные лесные территории (МЛТ), на- ряду с заповедниками, остаются «островами» есте- ственно развивающихся лесных сообществ посреди «океана» лесов, претерпевающего трансформацию от активной деятельности человека [1]. В отличие от заповедных лесов, куда доступ человека возможен только по специальному разрешению, посетители территории МЛТ вполне свободно могут заниматься добычательской рекреацией, но запрещена заготовка древесины [19]. При этом МЛТ не испытывают высо- кой рекреационной нагрузки, как, к примеру, город- ские леса. В такой роли МЛТ представляют интерес для изучения, как объекты, развивающиеся аналогич- но эпохе «собирательской» деятельности местного населения, главенствующей на территории нынешне- го Пермского края. В связи с этим, целью исследова- ний является инвентаризация флоры высших сосуди- стых растений и биоты агарикоидных грибов, а также

выявление почвенного разнообразия свежих и влажных лесорастительных условий в зоне МЛТ на территории Красновишерского городского округа. В задачи исследований входила инвентаризация и экологический анализ флоры высших сосудистых растений, изучение видового состава и эколого-ценотических особенностей агарикоидных базидиомицетов, установление таксономического разнообразия почв изучаемой территории.

Материалы и методы исследований

Красновишерский городской округ расположен в северо-восточной части Пермского края в предгорьях и горах Северного Урала, в бассейне реки Вишера [1]. Территория района исследований находится в окрест

ностях горы Шудья-Пендыш, где проходит граница между активно осваиваемой лесной зоной и еще сохранившимися участками МЛТ (кварталы 81, 102, 103, 123 и 124 Вайского участкового лесничества) (рис. 1 / fig. 1). По ботанико-географическому районированию Пермского края территория относится к району средне- и южнотаежных предгорных пихтово-еловых и елово-пихтовых лесов, который отличается от равнинных большей примесью пихты и сосны сибирской, преобладанием трав над кустарничками и широким распространением травяных, особенно папоротниковых, типов леса. Значительные площади покрыты вторичными березняками и смешанными лесами [21]. По географическому районированию Пермского края территория относится к Центральному Уралу [8].

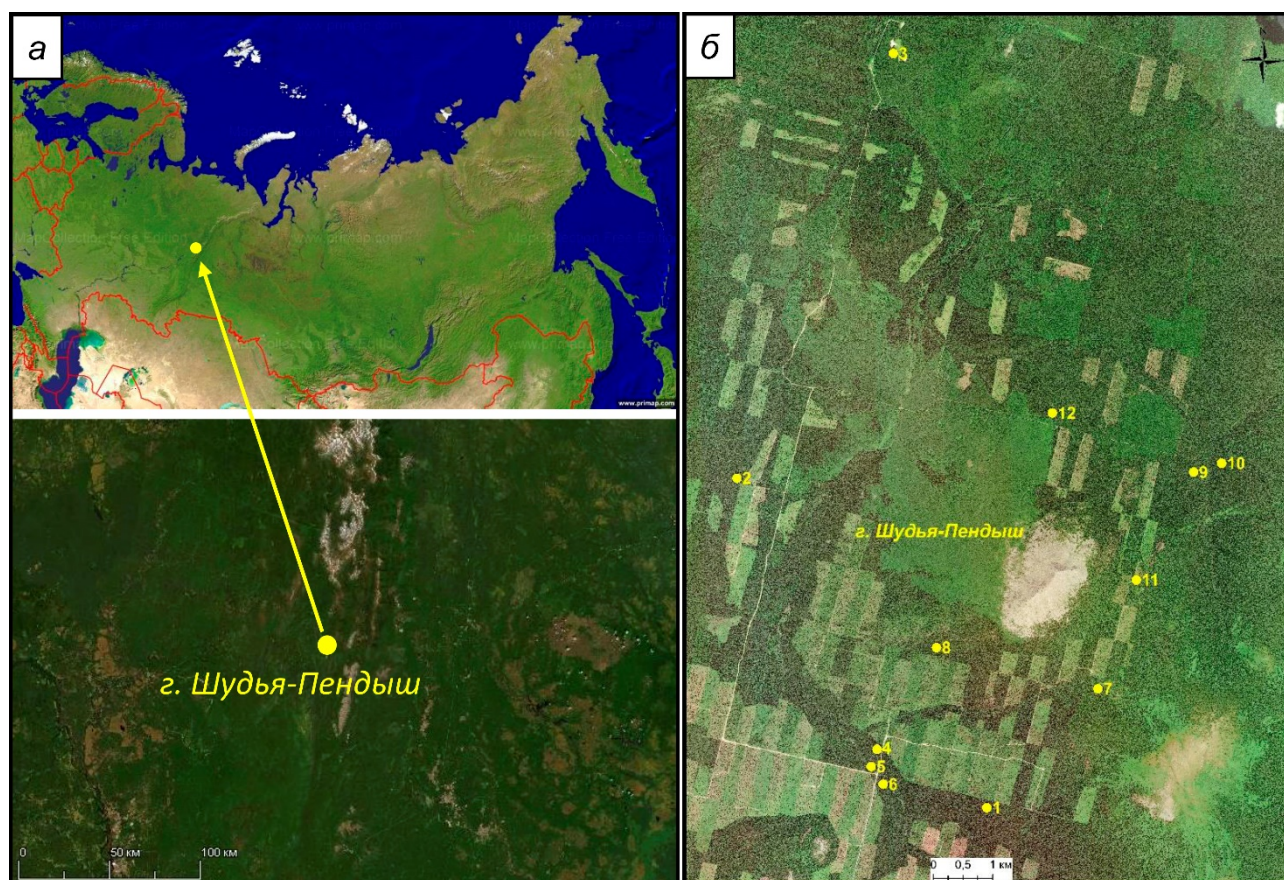


Рис. 1. Географическое положение г. Шудья-Пендыш (а) и картосхема расположения пробных площадей в ее окрестностях (б)

Fig. 1. Geographical position of Mount Shudya-Pendysh (a) and a map diagram of the location of test areas in its vicinity (b)

Исследования проводились в летний период 2021 г. на 12 пробных площадях в наиболее распространенных типах леса (в границах МЛТ на территории Вайского лесничества). В настоящей работе приводятся данные по насаждениям, формирующимся в свежих и влажных лесорастительных условиях – ельники: мшистый, папоротниковый, нагорный и березняк кисличный (тип леса: ельник мшистый). Насаждения для исследований подбирались спелые и перестойные. Таксация лесов отобранных лесотаксационных выделов осуществлялась глазомерным способом с использованием элементов измерительной таксации

[20]. Геоботанические описания фитоценозов проводились по стандартной методике [23]. Сбор и гербаризация образцов агарикоидных грибов проводились по общепринятым методикам [24, 25]. Латинские названия грибов приведены в соответствии с международной базой данных Mucobank Database [32]. Для установления типа почвы для соответствующего типа леса в исследуемых выделах закладывались почвенные разрезы [11]. Сходство биогеоценозов по видовому составу сосудистых растений и агарикоидных грибов устанавливалось с помощью коэффициента Жаккара [31].

Результаты и их обсуждение

Горные лесные бурые почвы (буроземы) описываемой территории имеют свои особенности, отличающие их от почв равнинных территорий. В профиле изучаемых почв морфологические признаки оподзоленности не выражены, несмотря на наличие елово-пихтовых лесов, кислого лесного опада и низких значений pH. Бурые почвы занимают менее 6,5 % площади края и формируются в особых экологических условиях [12]. *Бурозём типичный, тёмногумусовый, грубогумусовый на пермских глинах, элювии известняков и метаморфических пород* внесён в перечень ред-

ких почв на территории Пермского края, занесенных в Красную книгу почв Пермского края (на сегодняшний день проект Красной книги почв Пермского края находится на стадии утверждения). На изучаемой территории к указанным типам относятся все вскрытые почвенные разрезы, что позволяет выделить ценные почвенные объекты в границах ареалов распространения этих почв.

Флора сосудистых растений изучаемой территории. На изучаемой территории выявлено 39 видов сосудистых растений, относящихся к 37 родам, 25 семействам и 3 отделам (таблица 1 / table 1)

Таблица 1

Таксономический состав флоры сосудистых растений изучаемых биогеоценозов

Table 1

Taxonomic composition of the flora of vascular plants of the studied biogeocenoses

Семейство (число видов/число родов) // Family (number of species/number of genera)	Роды (число видов) // Genera (number of species)	В том числе, видов // Including species			
		ПП № 2 // SP № 2	ПП № 3 // SP № 3	ПП № 9 // SP № 9	ПП № 11 // SP № 11
Asteraceae (1/1)	<i>Cirsium</i> (1)	1	–	–	–
Betulaceae (1/1)	<i>Betula</i> (1)	1	1	1	1
Boraginaceae (1/1)	<i>Myosotis</i> (1)	–	–	1	–
Caprifoliaceae (1/1)	<i>Linnaea</i> (1)	1	–	1	–
Caryophyllaceae (1/1)	<i>Stellaria</i> (1)	–	–	1	–
Cyperaceae (1/1)	<i>Carex</i> (1)	–	–	–	1
Ericaceae (1/1)	<i>Vaccinium</i> (1)	1	–	1	1
Fabaceae (1/1)	<i>Lathyrus</i> (1)	–	1	–	–
Geraniaceae (1/1)	<i>Geranium</i> (1)	1	–	1	–
Juncaceae (1/1)	<i>Luzula</i> (1)	1	–	–	–
Liliaceae (2/2)	<i>Maianthemum</i> (1), <i>Veratrum</i> (1)	1	1	1	1
Onagraceae (1/1)	<i>Chamaenerion</i> (1)	1	–	–	–
Oxalidaceae (1/1)	<i>Oxalis</i> (1)	1	1	1	–
Poaceae (2/2)	<i>Calamagrostis</i> (1), <i>Deschampsia</i> (1)	1	1	1	2
Polygonaceae (1/1)	<i>Polygonum</i> (1)	–	–	–	1
Pyrolaceae (2/2)	<i>Pyrola</i> (1), <i>Orthilia</i> (1)	1	2	1	–
Ranunculaceae (3/3)	<i>Aconitum</i> (1), <i>Thalictrum</i> (1), <i>Atragene</i> (1)	–	3	1	–
Rosaceae (7/5)	<i>Sorbus</i> (1), <i>Rubus</i> (3), <i>Fragaria</i> (1), <i>Spiraea</i> (1), <i>Rosa</i> (1)	5	4	3	1
Salicaceae (1/1)	<i>Populus</i> (1)	–	1	–	–
Saxifragaceae (1/1)	<i>Ribes</i> (1)	–	1	–	–
Pinaceae (3/3)	<i>Abies</i> (1), <i>Picea</i> (1), <i>Pinus</i> (1)	3	3	3	2
Aspidiaceae (2/2)	<i>Dryopteris</i> (1), <i>Gymnocarpium</i> (1)	2	1	2	2
Athyriaceae (1/1)	<i>Athyrium</i> (1)	1	–	1	1
Equisetaceae (1/1)	<i>Equisetum</i> (1)	1	–	1	–
Lycopodiaceae (1/1)	<i>Lycopodium</i> (1)	1	–	1	–
25	37 (39)	24	20	23	13

*Примечания:

ПП № 2 – ельник мошустый; ПП № 3 – березняк кисличный (тип леса: ельник мошустый); ПП № 9 – ельник папоротниковый; ПП № 11 – ельник нагорный.

*Notes:

SP № 2 – mossy spruce forest; SP № 3 – sorrel birch forest (type of forest is mossy spruce forest); SP № 9 – filical spruce forest; SP № 11 – montane spruce forest.

Преобладающими по числу видов являются семейства *Rosaceae* Juss. (17,9 % от общего числа выявленных видов), *Poaceae* Barnhart и *Ranunculaceae* Juss. (по 7,7 %). Для остальных семейств выявлено по 1–2 вида растений. Численно преобладают одновидовые роды, лишь для рода *Rubus* выявлено 3 вида. Наибольшее сходство по видовому составу установлено между ельниками: мшистым (ПП № 2) и папоротниковым (ПП № 9) ($J = 74,1$). Между остальными сообществами коэффициенты Жаккара составили 22,2–34,4.

Доминирующее положение в спектре жизненных форм занимают гемикриптофиты (43,6 %), остальные жизненные формы представлены меньшим числом видов (2,6–15,4 %). Это указывает на умеренно-холодный голарктический характер флоры [22]. Экологический анализ флоры демонстрирует распределение видов по типам местообитаний с отношением к водному режиму местообитания. Установлено преобладание мезофитов (аналогично флоре Пермского края) – они составляют 79,5 % видов флоры, довольно высок процент гигрофитов (17,9 %), что свидетельствует о наличии прибрежноводных местообитаний на описываемой территории. Меньшее участие во флоре, но при этом достаточное по значимости, занимают ксеромезофиты – 2,6 %, это виды скальных местообитаний. Таким образом, биоморфологический и экологический спектр флоры обследованной территории сходны по ключевым элементам со спектром флоры Пермского края.

Эколого-ценотическая характеристика исследуемых биогеоценозов. Ельник мшистый (ПП № 2, квартал 99, выдел 6). В древостое доминирует *Picea obovata* Ledeb., довольно велика роль *Abies sibirica* Ledeb. и *Pinus sylvestris* L., реже встречается *Betula pubescens* Ehrh. Подлесок практически отсутствует. Кустарниковый ярус состоит преимущественно из *Rosa acicularis* Lindl. В травянисто-кустарничковом ярусе доминирует *Vaccinium myrtillus* L., к ней примешиваются *Equisetum sylvaticum* L., *Trientalis europaea* L., *Maianthemum bifolium* (L.) F.W.Schmidt, *Gymnocarpium dryopteris* (L.) Newm., *Athyrium filix-femina* (L.) Roth, *Rubus saxatilis* L., *Rubus humulifolius* С.А.Меу. Напочвенный покров почти сплошной, образован *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Sphagnum* sp., *Hylocomium splendens* (Hedw.) Br., Sch. et Gmb. Почвенный разрез (ПП № 2) заложен на склоне восточной экспозиции на высоте 472 м, координаты разреза: N 60°35.735'; E 58°50.792'. Почва: Бурозём грубогумусовый глееватый среднемогучный среднесуглинистый на элюво-делювии плотных коренных пород. Формула профиля: **АО-ВМg-Cg**. Выклинивание воды на глубине 66 см.

Ельник папоротниковый (ПП № 9, квартал 103, выдел 2). В древесном ярусе преобладает *Picea obovata*, в меньшей степени представлена *Betula pubescens*, единично присутствуют в древостое *Pinus sibirica* Du Tour и *Abies sibirica*. Подлесок состоит из *Sorbus aucuparia* L. Кустарниковый ярус отсутствует.

В травянисто-кустарничковом ярусе преобладают типичные лесные виды растений: *Oxalis acetosella* L., *Linnaea borealis* L., *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth, *Phegopteris connectilis* (Michx.) Watt, представлены *Gymnocarpium dryopteris*, *Vaccinium myrtillus*, *Rubus humulifolius*. Напочвенный покров почти сплошной. Среди мхов доминируют *Pleurozium schreberi* и *Hylocomium splendens*. Почвенный разрез (ПП № 7) был заложен высоте 479 м, координаты разреза: N 60°35.685'; E 58°59.337'. Почва: Бурозём грубогумусовый среднемогучный тяжелосуглинистый на элюво-делювии плотных коренных пород. Формула профиля: **АО-ВМ-С**. Выклинивание воды на глубине 60 см.

Ельник нагорный (ПП № 11, квартал 124, выдел 4). Древостой разрежен. В нем преобладают *Picea obovata*, *Betula pubescens*, в меньшей степени *Abies sibirica*. Подлесок отсутствует. В травянисто-кустарничковом ярусе доминируют различные виды папоротников (*Gymnocarpium dryopteris*, *Athyrium filix-femina*) и *Vaccinium myrtillus*. К ним примешиваются *Linnaea borealis*, *Trientalis europaea*, *Maianthemum bifolium*, *Rubus saxatilis* и другие. Моховой ярус разрежен, образован *Pleurozium schreberi*, *Ptilium crista-castrensis* (Hedw.) De Not. Почвенный разрез (ПП № 8) был заложен на склоне северо-восточной экспозиции под ельником нагорным слаборазвито-дифференцированным на высоте 730 м, координаты разреза: N 60°34.728'; E 58°58.162'. Почва: Бурозём грубогумусовый глинисто-иллювицированный среднемогучный тяжелосуглинистый на элюво-делювии плотных коренных пород. Формула профиля: **АО-ВМi-С**.

Березняк кисличный (тип леса: ельник мшистый; ПП № 3, квартал 36, выдел 2). В древостое преобладает *Betula pubescens*, довольно значительно примесь *Abies sibirica*. В меньшей степени отмечены *Pinus sibirica*, *Picea obovata* и *Populus tremula* L. В подросте преобладает *Picea obovata*. Подлесок разрежен и образован *Sorbus aucuparia*. Травяно-кустарничковый ярус разрежен, он состоит из *Oxalis acetosella*, *Aconitum septentrionale* Koelle, *Maianthemum bifolium*, *Rubus saxatilis*, *Calamagrostis arundinacea*. Напочвенный покров почти сплошной на старых поваленных деревьях, образованный *Pleurozium schreberi*, *Hylocomium splendens*, *Ptilium crista-castrensis*, *Dicranum* sp., *Rhytidiadelphus triquetrus* (Hedw.) Warnst. Почвенный разрез (ПП № 3) был заложен на склоне западной экспозиции к р. Бол. Шудья, под березовым лесом на высоте 294 м, координаты разреза: N 60°39.554'; E 58°53.996'. Почва: Бурозём темногумусовый тяжелосуглинистый элюво-делювии плотных коренных пород. Формула профиля: **АUh-ВМ-R**.

Биота агарикоидных базидиомицетов исследуемой территории. В исследуемых сообществах выявлено 58 видов агарикоидных базидиомицетов, относящихся к 27 родам, 17 семействам и 4 порядкам (таблица 2 / table 2).

Таблица 2

Таксономический состав агарикоидных базидиомицетов изучаемых биогеоценозов

Table 2

Taxonomic composition of agaricoid basidiomycetes of the studied biogeocenoses

Семейство (число видов/число родов) // Family (number of species/number of genres)	Роды (число видов) // Genuses (number of species)	В том числе, видов // Including species			
		ПП № 2// SP № 2	ПП № 3// SP № 3	ПП № 9// SP № 9	ПП № 11// SP № 11
Agaricaceae (1/1)	<i>Lepiota</i> (1)	–	1	–	–
Amanitaceae (1/1)	<i>Amanita</i> (1)	–	–	1	–
Cortinariaceae (9/1)	<i>Cortinarius</i> (9)	3	4	5	–
Hydnangiaceae (1/1)	<i>Laccaria</i> (1)	1	–	1	1
Hygrophoraceae (2/2)	<i>Ampulloclitocybe</i> (1); <i>Hygrophorus</i> (1)	1	–	2	–
Hygrophoropsidaceae (1/1)	<i>Hygrophoropsis</i> (1)	–	1	–	–
Inocybaceae (2/2)	<i>Inocybe</i> (1); <i>Pseudosperma</i> (1)	–	2	–	–
Mycenaceae (6/2)	<i>Mycena</i> (5); <i>Xeromphalina</i> (1)	1	3	3	2
Omphalotaceae (6/3)	<i>Gymnopus</i> (3); <i>Paragymnopus</i> (1); <i>Rhodocollybia</i> (2)	1	4	1	3
Pleurotaceae (1/1)	<i>Pleurotus</i> (1)	–	1	–	–
Pluteaceae (2/1)	<i>Pluteus</i> (2)	1	1	1	1
Strophariaceae (6/4)	<i>Galerina</i> (1); <i>Hypholoma</i> (1); <i>Pholiota</i> (3); <i>Stropharia</i> (1)	–	3	2	3
Tricholomataceae (3/2)	<i>Collybia</i> (2); <i>Infundibulicybe</i> (1)		3	2	
Paxillaceae (1/1)	<i>Paxillus</i> (1)	1	–	1	1
Suillaceae (1/1)	<i>Suillus</i> (1)	1	–	–	–
Rickenellaceae (1/1)	<i>Rickenella</i> (1)	1	–	1	–
Russulaceae (14/2)	<i>Lactarius</i> (7); <i>Russula</i> (7)	6	3	8	5
17	27 (58)	17	26	28	16

*Примечания:

ПП № 2 – ельник мшистый; ПП № 3 – березняк кисличный (тип леса: ельник мшистый); ПП № 9 – ельник папоротниковый; ПП № 11 – ельник нагорный.

*Notes:

SP № 2 – mossy spruce forest; SP № 3 – sorrel birch forest (type of forest is mossy spruce forest);

SP № 9 – filical spruce forest; SP № 11 – montane spruce forest.

Ведущими по числу видов оказались семейства *Russulaceae* (14 видов, 24,1 % от общего числа выявленных в изучаемых ценозах видов) и *Cortinariaceae* (9 видов, 15,5 %), что характерно для лесной зоны северных широт. В более южных биотах ведущее положение занимает сем. *Tricholomataceae*, а с продвижением на север на первое место перемещается сем. *Cortinariaceae* [15, 18]. К семействам *Mycenaceae* и *Omphalotaceae* относится по 6 видов (по 10,3 %). В состав сем. *Strophariaceae* также входит 6 видов (10,3 %), что подчеркивает активность процессов деградации древесного опада, где агарикомицеты оказываются на завершающем этапе.

Спектр ведущих родов в убывающем порядке представлен следующим рядом: *Cortinarius* → *Russula* → *Lactarius* → *Mycena*. Представители указанных родов содержат 28 видов, что составляет 48,3 % от общего их выявленного числа. Значительное разнообразие видов рода *Cortinarius* характерно для лесных экосистем северных широт [17]. В 5 родах насчитывалось по 2–3 вида, а для 18 родов выявлено по одному

виду. Следовательно, биота агарикоидных базидиомицетов Вайского лесничества типична для бореальных лесных ценозов.

В исследуемых сообществах обнаружено два вида грибов, новых для Пермского края: *Cortinarius betulinus* J. Favre (ельник папоротниковый, ПП № 9, N 60°35.685'; E 58°59.337') и *Suillus acidus* (Peck) Singer (ельник мшистый, ПП № 2, N 60°35.735'; E 58°50.792'). В ельнике папоротниковом, ельнике нагорном и березняке кисличном выявлен охраняемый лишайник – *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm. Вид занесен в Красную книгу Российской Федерации и Пермского края (статус – III). В Пермском крае в горах Северного Урала вид многочисленен, в южных районах встречается редко.

На обследованных учетных площадях число видов грибов варьирует от 16 до 28. Большинство видов (36 видов, 62 %) встречалось только на какой-либо одной учетной площади, 16 видов грибов (28 %) обнаруживали одновременно на двух пробных площадях. 5 видов (9 %) оказались с широкой экологической ампли-

тудой и отмечены одновременно на трех учетных площадях: *Laccaria laccata* (Scop.) Cooke, *Mycena pura* (Pers.) P. Kumm., *Paxillus involutus* (Batsch) Fr., *Pluteus cervinus* (Schaeff.) P. Kumm. и *Pholiota lubrica* (Pers.) Singer. На всех пробных площадях выявлен только *Paragymnopus perforans* (Hoffm.) J.S. Oliveira. Изучаемые сообщества различаются по видовому составу агарикомицетов: коэффициенты Жаккара составили 7,5–36,4. Наибольшее сходство, как и для сосудистых растений, выявлено между ельниками: мшистым (ПП № 2) и папоротниковым (ПП № 9) ($J = 36,4$). Между остальными ценозами коэффициенты сходства не превышали 18,9.

По трофической приуроченности агарикоидные базидиомицеты изучаемых ценозов Вайского лесничества входят в состав 6 групп: микоризообразователи (55,2 % от общего числа видов), ксилотрофы (20,7 %), сапротрофы на подстилке (15,5 %), микотрофы (3,4 %), бриотрофы (3,4 %) и гумусовые сапротрофы (1,7 %). К группе микоризообразователей принадлежит 32 вида. Большое разнообразие этой группы грибов связано с разнообразным видовым составом высокомикотрофных древесных растений. Ведущими семействами являются *Russulaceae* и *Cortinariaceae*. Большинство микоризных грибов, обнаруженных на исследуемой территории, вступают в симбиоз только с хвойными породами деревьев. Это объясняется широким распространением и обилием хвойных деревьев во флоре исследуемой территории. Кроме того, хвойные деревья являются высокомикотрофными. Наиболее узкоспециализированы микоризообразователи сосны сибирской, например, *Suillus acidus*. Ксилотрофы являются обширной трофической группой сапротрофного блока. В исследуемых ценозах выявлено 12 видов (20,7 %), многие из которых поселяются, преимущественно, на древесине хвойных. Большинство представителей принадлежит семейству *Strophariaceae*: *Hypholoma lateritium* (Schaeff.) P. Kumm., *Pholiota lubrica*, *Galerina marginata* (Batsch) Kühner и некоторые другие. Из сем. *Pluteaceae* к ксилотрофам относится *Pluteus cervinus* и *P. hiatus* Romagn.

Подстилочные сапротрофы включают 9 видов (15,5 %). В основном это представители семейств: *Omphalotaceae* (*Gymnopus dryophilus* (Bull.) Murril, *Paragymnopus perforans* и другие) и *Mycenaceae* (*Mycena pura* (Pers.) P. Kumm. и *Xeromphalina fraxinophila* A.H. Sm.). Микотрофы поселяются на плодовых телах макромицетов. В данную группу входят представители рода *Collybia* сем. *Tricholomataceae*: *C. cookei* (Bres.) J.D. Arnold и *C. tuberosa* (Bull.) P. Kumm. Они, как правило, появляются на старых плодовых телах видов сем. *Russulaceae*. Из бриотрофов обнаружены *Rickenella swartzii* (Fr.) Kuiper и *Mycena oregonensis* A.H. Sm., которая может быть и сапротрофом на подстилке. Гумусовые сапротрофы редки в хвойных лесах, к данной группе относится только один вид – *Lepiota magnispora* Murrill, выявленный в березняке кисличном (ПП № 3). Таким образом, из 6 эколого-трофических групп грибов ведущее положение занимают микоризные грибы, но велика доля древо-разрушающих грибов (ксилотрофы).

Заключение

Наиболее типичными почвами для обследованных участков являются буроземы грубогумусовые средне- и тяжелосуглинистые на элюво-делювии коренных пород. *Бурозёмы типичные, тёмногумусовые и грубогумусовые формирующиеся на пермских глинах, элювии известняков и метаморфических пород* внесены в перечень редких почв на территории Пермского края, занесенных в Красную книгу почв Пермского края (на сегодняшний день проект Красной книги почв Пермского края находится на стадии утверждения), что позволяет выделить ценные почвенные объекты (ЦПО) в границах ареалов распространения этих почв.

В результате проведенных исследований в лесных ценозах Вайского лесничества зафиксировано 39 видов высших сосудистых растений, относящихся к 37 родам, 25 семействам и 3 порядкам. Преобладающими по числу видов являются семейства *Rosaceae*, *Poaceae* и *Ranunculaceae*. Доминирующее положение в спектре жизненных форм занимают гемикриптофиты (43,6 %), остальные жизненные формы представлены меньшим числом видов (2,6–15,4 %). По результатам экологического анализа флоры установлено преобладание мезофитов, а также, наличие гигрофитов и ксеромезофитов. Биоморфологический и экологический спектр флоры обследованной территории сходны по ключевым элементам со спектром флоры Пермского края.

В изучаемых биогеоценозах выявлено 58 видов агарикоидных базидиомицетов, относящихся к 27 родам, 17 семействам и 4 порядкам. Установлено два вида грибов, новых для Пермского края: *Cortinarius betulinus* и *Suillus acidus*, кроме того, обнаружен лишенизированный гриб (отдел Ascomycota), внесенный в Красные книги Российской Федерации и Пермского края (статус III) – *Lobaria pulmonaria*. Ведущими по числу видов оказались семейства *Russulaceae* (24,1 %) и *Cortinariaceae* (15,5 %), что характерно для лесной зоны северных широт. Из родов наиболее представлен *Cortinarius*. Таким образом, биота агарикоидных базидиомицетов Вайского лесничества по соотношению таксонов разного ранга типична для бореальных лесных ценозов северных широт. Большинство видов грибов (62 %) встречалось только на какой-либо одной учетной площади. По трофической приуроченности агарикоидные базидиомицеты изучаемых ценозов входят в состав 6 эколого-трофических групп: микоризообразователи, ксилотрофы, подстилочные сапротрофы, гумусовые сапротрофы, микотрофы, бриотрофы. Лидирующее положение занимает группа микоризообразователей.

Наибольшее сходство видового состава выявлено между ельниками: мшистым (ПП № 2) и папоротниковым (ПП № 9), как по высшим сосудистым растениям ($J = 74,1$), так и по агарикомицетам ($J = 36,4$). Между остальными ценозами коэффициенты Жаккара по высшим сосудистым растениям составили 22,2–34,4, по агарикоидным грибам – 7,5–18,9.

Целесообразно сохранение относительно крупных эталонных ненарушенных природных комплексов типичных для Северного Урала и его предгорной части. Изученная территория в окрестностях горы Шудья-Пендыш заслуживает статуса особо охраняемой в Пермском крае.

Сведения об авторском вкладе

С.А. Бузмаков – подготовка концепции работы, вычитка финального варианта статьи.

Л.Г. Переведенцева – определение агарикоидных базидиомицетов, вычитка финального варианта статьи.

С.Ю. Бердинских – подготовка первого варианта рукописи, подготовка таблиц и рисунков для рукописи, вычитка финального варианта статьи.

В.С. Боталов – подготовка первого варианта рукописи, подготовка таблиц и рисунков для рукописи, вычитка финального варианта статьи.

А.В. Романов – определение типов почв, вычитка финального варианта статьи.

Е.Л. Гатина – определение высших растений, вычитка финального варианта статьи.

И.Е. Шестаков – определение типов почв, вычитка финального варианта статьи.

А.Г. Зайцев – вычитка финального варианта статьи.

Contribution of the authors

S.A. Buzmakov – preparation of the concept of the article, proofreading of the final version of the article.

L.G. Perevedentseva – identification of agaricoid basidiomycetes, proofreading of the final version of the article.

S.Y. Berdinsky – preparation of the first version of the manuscript, preparation of tables and figures for the manuscript, proofreading of the final version of the article.

V.S. Botalov – preparation of the first version of the manuscript, preparation of tables and figures for the manuscript, proofreading of the final version of the article.

A.V. Romanov – identification types of soils, proofreading the final version of the article.

E.L. Gatina – identification of higher plants, proofreading of the final version of the article.

I.E. Shestakov – identification of soil types, proofreading of the final version of the article.

A.G. Zaitsev – proofreading of the final version of the article.

Список источников

1. Аксенов Д.Е., Добрынин Д.В., Дубинин М.Ю., Егоров А.В., Исаев А.С., Карпачевский М.Л., Лестадус Л.Г., Потапов П.В., Пуреховский А.Ж., Турубанова С.А., Ярошенко А.Ю. Атлас малонарушенных лесных территорий России. М.: МСОЭС; Вашингтон: World Resources Inst., 2003. 187 с.

2. Алексеенков Ю.М., Ермакова М.В. Особенности структуры коренных темнохвойных древостоев Вишерского заповедника // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. № 227. С. 19–31. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2019.227.19-33>

3. Баландин С.В. Лесная высокогорная растительность хребта Чувальский камень (Вишерский заповедник) // Географический вестник. 2009. № 3 (11). С. 24–27.

4. Белковская Т.П., Переведенцева Л.Г., Мухутдинов О.И., Селиванов А.Е., Бахарев П.Н., Прокошева И.В. Растительность и флора, грибы, лишайники

заповедника Вишерский. Соликамск: Типограф, 2014. 400 с.

5. Бузмаков С.А. Региональные вопросы устойчивого развития особо охраняемых природных территорий // Антропогенная трансформация природной среды. 2020. № 6. С. 48–55. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2020-6-48-55>

6. Бузмаков С.А. Сеть особо охраняемых природных территорий Пермского края // Географический вестник. 2020. № 3 (54). С. 135–148. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-3-135-148>

7. Бузмаков С.А. Устойчивое развитие и региональная сеть ООПТ // Экологические проблемы. Взгляд в будущее: сборник трудов IX международной научно-практической конференции. БП и СОТ «Вятка» – БП и СОТ «Лиманчик», 22–23 октября 2020 г. / ред. Ю.А. Федоров. Ростов-на-Дону – Таганрог: Издательство Южного федерального университета. 2020. С. 86–89.

8. Бузмаков С.А., Зайцев А.А. Состояние региональных особо охраняемых природных территорий Пермского края // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2011. № 3. С. 3–12.

9. Бузмаков С.А., Зайцев А.А., Санников П.Ю. Актуальное состояние сети ООПТ Пермского края // Вопросы степеведения. 2019. № 15. С. 55–58. <https://doi.org/10.24411/9999-006A-2019-11507>

10. Бузмаков С.А., Санников П.Ю. Перспективы создания сети особо охраняемых природных территорий г. Перми // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2012. № 3. С. 14–22.

11. Еремченко О.З., Кайгородов Р.В., Москвина Н.В. Полевая практика по почвоведению: учебно-методическое пособие. Пермь: ПГУ, 2005. 51 с.

12. Еремченко О.З., Шестаков И.Е., Чирков Ф.В., Филькин Т.Г. Выделение редких и исчезающих почв в связи с созданием Красной книги почв Пермского края // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2008. № 9 (25). С. 63–69.

13. Заидуллина А.Т. Пространственная структура, динамика и продуктивность лишайниково-зеленомошных сосняков (Карельский лесной район): дис. ... канд. биол. наук: 1.5.15. СПб., 2021. 171 с.

14. Кучеров И.Б., Кутенков С.А. Олиготрофные сфагновые ельники Европейской России и сопредельных территорий // Ботаника в современном мире: труды XIV Съезда Русского ботанического общества и конференции Русское ботаническое общество. Махачкала, 18–23 июня 2018 г. Т. 2. / отв. ред. А.Л. Буданцев. Махачкала: АЛЕФ, 2018. С. 82–85.

15. Марина Л.В. Таксономическая структура микобиоты агарикоидных базидиомицетов Висимского заповедника // Современная микология в России: Первый съезд микологов России: тезисы докладов. Москва, 11–13 апреля 2002 г. М.: Национальная Академия микологии, 2002. С. 113–114.

16. Наумкин Д.В. Биоразнообразие и биологическая репрезентативность заповедника «Басеги» (Перм-

ский край): состояние изученности // Географический вестник. 2015. № 1 (32). С. 75–80.

17. *Нездойминого Э.Л.* Определитель грибов России. Порядок агариковые. Вып. 1. Семейство Паутинниковые. СПб.: Наука, 1996. 408 с.

18. *Нездойминого Э.Л.* Базидиальные макромицеты в горных тундрах Полярного Урала // Микология и фитопатология. 2001. Т. 35. № 2. С. 26–29.

19. Национальный стандарт лесопользования FSC для Российской Федерации. FSC-STD-RUS-02.1-2020 RU.

20. Об утверждении Лесоуправляющей инструкции: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации N 122 от 29.03.2018.

21. *Овеснов С.А.* Ботанико-географическое районирование Пермской области // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2000. № 2. С. 13–21.

22. *Овеснов С.А.* К флоре Красновишерского района Пермской области. 2. Анализ флоры // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. № 2. 2004. С. 7–13.

23. *Овеснов С.А., Ефимик Е.Г.* Биоразнообразие и экология высших растений: учебное пособие по учебной практике. Пермь: ПГУ, 2009. 129 с.

24. *Переведенцева Л.Г.* Биота и экология агарикоидных базидиомицетов Пермской области: автореф. дис. ... докт. биол. наук: 03.00.24. М., 1999. 48 с.

25. *Переведенцева Л.Г.* Биоразнообразие и экология низших растений. Методика сбора, описания и определения агарикоидных базидиомицетов: метод. указ. для летн. полев. практики. Пермь: ПГУ, 2007. 28 с.

26. *Рогозин М.В.* Природные феномены в Красновишерском районе (Пермский край) и синергетика малых геоактивных зон // Геоэкология, инженерная геодинамика, геологическая безопасность. Печеркинские чтения. Пермь, 15 ноября 2021 г. / гл. ред. И.С. Копылов. Пермь, 2022. С. 139–148.

27. *Рогозин М.В.* Плюсовые деревья сосны и геоактивные зоны // Научное обозрение. Биологические науки. 2022. № 1. С. 5–9.

28. *Самофалова И.А.* Пространственно-структурная организация почвенного покрова западного макросклона Среднего Урала: автореф. дис. ... докт. биол. наук: 03.02.13. Пермь, 2021. 47 с.

29. *Смирнова О.В., Бобровский М.В., Ханина Л.Г., Смирнов В.Э.* Сукцессионный статус старовозрастных темнохвойных лесов Европейской России // Успехи современной биологии. 2006. Т. 126. № 1. С. 26–48.

30. *Шавнин С.А., Алесенков Ю.М., Андреев Г.В., Поздеев Е.Г., Иванчиков С.В.* Соотношение высот и диаметров основных лесообразующих пород в Вишерском заповеднике // Аграрный Вестник Урала. 2009. № 11 (65). С. 118–121.

31. *Шмидт В.М.* Математические методы в ботанике. Л.: Наука, 1973. 263 с.

32. MycoBank Database [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mycobank.org> (дата обращения: 10.10.2022).

References

1. Aksenov, D., Dobrynin, D., Dubinin, M., Egorov, A., Isaev, A., Karpachevskii, M., Lestadius, L., Potapov, P., Purekhovskii, A., Turubanova, S. and Yaroshenko, A., 2003. *Atlas malonarushennykh lesnykh territorii Rossii* [Atlas of intact forest territories of Russia]. Moscow, MSOES publ., Washington, World Resources Institute publ. 187 p. (in Russian)

2. Alekseenkov, Yu. and Ermakova, M., 2019. Features of structure of radical darkconiferous forest stands of Vishera Nature Reserve. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoj Akademii.* (227), pp. 19–31. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2019.227.19-33> (in Russian)

3. Balandin, S., 2009. Forest high-mountainous vegetation of the ridge the Chuvalsky Stone (Vishera reservation). *Geographical Bulletin.* 3(11), pp. 24–27. (in Russian)

4. Belkovskaya, T., Perevedentseva, L., Mukhutdinov, O., Selivanov, A., Bakharev, P. and Prokosheva, I., 2014. *Rastitel'nost' i flora, griby, lishainiki zapovednika Visherskii* [Vegetation and flora, fungi, lichens of the Vishersky Nature Reserve]. Solikamsk, Tipograf publ. 400 p. (in Russian)

5. Buzmakov, S., 2020. Regional issues of sustainable development of protected areas. *Anthropogenic Transformation of Nature,* (6), pp. 48–55. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2020-6-48-55> (in Russian)

6. Buzmakov, S., 2020. Network of protected natural areas in the Perm region. *Geographical Bulletin,* 3(54), pp. 135–148. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-3-135-148> (in Russian)

7. Buzmakov, S., 2020. Sustainable development and regional network of protected areas. In: Fedorov Yu. (ed.) *Ecological Problems. A Look into the Future: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference, 22–23 October 2020, recreation center «Vityaz», recreation center «Limanchik», Russia. Rostov-on-Don, Taganrog, Publishing House of Southern Federal University publ.* pp. 86–89. (in Russian)

8. Buzmakov, S. and Zaitsev, A., 2011. The state of protected areas in the Perm Territory. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences,* (3), pp. 3–12. (in Russian)

9. Buzmakov, S., Zaitsev, A. and Sannikov, P., 2020. Actual condition of the network of specially protected natural territories of the Perm Territory. *Steppe Science,* (15), pp. 55–58. <https://doi.org/10.24411/9999-006A-2019-11507> (in Russian)

10. Buzmakov, S. and Sannikov, P., 2012. Perspectives for development of the system of nature reserves in the city of Perm. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences.* (3), pp. 14–22. (in Russian)

11. Eremchenko, O., Kaigorodov, R. and Moskvina, N., 2005. *Polevaya praktika po pochvovedeniyu: uchebno-metodicheskoe. posobie* [Field practice in soil science: educational and methodical. stipend]. Perm, PSU publ. 51 p. (in Russian)

12. Eremchenko, O., Shestakov, I., Chirkov, F. and Filkin, T., 2008. The distinction of rare and threatened soils in connection with the creation of the Perm region

Red Data List of soils. *Bulletin of Perm University. Biology*, 9(25), pp. 63–69. (in Russian)

13. Zagidullina, A., 2021. *Prostranstvennaya struktura, dinamika i produktivnost' lishainikovo-zelenomoshnykh sosnyakov (Karel'skii lesnoi raion)* [Spatial structure, dynamics and productivity of lichen-mossy pine forests (Karelian forest region)]. PhD Dissertation of Sciences in Biology. Saint Petersburg, 171 p.

14. Kucherov, I. and Kutenkov, S., 2018. Oligotrophic peatmoss-spruce forests of European Russia and the adjacent areas. In: Budancev, A. (ed.). *Russian Botany in the Modern World: Proceedings of the XIV Congress of the Russian Botanical Society and the conference of the Russian Botanical Society*. Vol. 2. Geobotany. Botanical resource studies. Introduction of plants. Cultivated plants, 18-23 June, 2018, Makhachkala, Russia. Makhachkala, ALEF, pp. 82–85. (in Russian)

15. Marina, L., 2002. Taxonomic structure of mycobiota of agaricoid basidiomycetes of the Visimsky Reserve. *Modern Mycology in Russia: The first Congress of mycologists of Russia: abstracts of reports*, 11–13 April, 2002, Moscow, Russia. Moscow, National Academy of Mycology, pp. 113–114. (in Russian)

16. Naumkin, D., 2015. Biodiversity and biologic representativeness of «Basegi» state Nature Reserve (Perm region): the review of studying. *Geographical Bulletin*, 1(32), pp. 75–80. (in Russian)

17. Nezdoiminogo, E., 1996. *Opredelitel' gribov Rossii. Poryadok agarikovyh. Vyp. 1. Semejstvo Pautinnikovye* [Definitorium Fungorum Rossiae. Ordo Agaricales. Fasc. 1. Familia Cortinariaceae]. Saint Petersburg, Nauka publ. 408 p. (in Russian)

18. Nezdoiminogo, E., 2001. Basidial macromycetes in mountain tundras of Polar Urals. *Mikologiya i fitopatologiya*, 35(2), pp. 26–29. (in Russian)

19. The FSC National Forest Stewardship Standard of Russian Federation. FSC-STD-RUS-02-2020 EN.

20. Ob utverzhdenii Lesoustroitel'noi instruktsii [On the approval of the Forest Management Instruction]. Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation N 122 from 29.03.2018. (in Russian)

21. Ovesnov, S., 2000. Botanical-geographical areas of Perm region. *Bulletin of Perm University. Biology*, (2), pp. 13–21. (in Russian)

22. Ovesnov, S., 2004. To the flora of Krasnovishersk area of Perm region. 2. The analysis of the flora. *Bulletin of Perm University. Biology*, (2), pp. 7–13. (in Russian)

23. Ovesnov, S. and Efimik, E., 2009. *Bioraznoobrazie i ekologiya vysshikh rastenii: uchebnoe posobie po uchebnoi praktike* [Biodiversity and ecology of higher plants: textbook. manual on educational practice]. Perm, PSU publ. 129 p. (in Russian)

24. Perevedentseva, L., 1999. *Biota i ekologiya agarikoidnykh bazidiomitsetov Permskoi oblasti* [Biota and ecology of agaricoid basidiomycetes of the Perm region]. Doctor's Dissertation Abstract of Sciences in Biology. Moscow, 48 p.

25. Perevedentseva, L., 2007. *Bioraznoobrazie i ekologiya nizshikh rasteniy. Metodika sbora, opisaniya i opredeleniya agarikoidnykh bazidiomitsetov: metod. ukaz. dlya letn. polev. praktiki* [Biodiversity and ecology of lower plants. Methods of collection, description and determination of agaricoid basidiomycetes: guidelines for summer field practice]. Perm, PSU publ. 28 p. (in Russian)

26. Rogozin, M., 2022. Natural phenomena in the Krasnovishersky district (Perm krai) and the synergetics of small geoactive zones. In: Kopylov, I. (ed.) *Geocology, Engineering geodynamics, Geological safety*. Pecherskieskie reading. 15 November 2021, Perm, Russia. Perm, pp. 139–148. (in Russian)

27. Rogozin, M., 2022. Plus trees and geoactive zones. *Biological Sciences*, (1), pp. 5–9. (in Russian)

28. Samofalova, I., 2021. *Prostranstvenno-strukturnaya organizatsiya pochvennogo pokrova zapadnogo makrosklona Srednego Urala* [Spatial and structural organization of the soil cover of the western macroscline of the Middle Urals]. Doctor's Dissertation Abstract of Sciences in Geography. Perm, 47 p.

29. Smirnova, O., Bobrovsky, M., Khanina, L. and Smirnov, V., 2006. Succession status of old-growth spruce and spruce-fir forests in European Russia. *Biology Bulletin Reviews*, 126(1), pp. 26–48. (in Russian)

30. Shavnin, S., Alesenkov, Yu., Andreev, G., Pozdeev, E. and Ivanchikov, S., 2009. Correlation heights and diameters of main forest forming species in Vishera Reserve. *Agrarnyi vestnik Urala*, 11(65), pp. 118–121. (in Russian)

31. Schmidt, V., 1973. *Matematicheskie metody v botanike* [Mathematical methods in botany]. Saint Petersburg, Nauka publ. 263 p. (in Russian)

32. MycoBank Database. Available from: <http://www.mycobank.org> [Accessed 10th October 2022].

Статья поступила в редакцию 05.10.2022; одобрена после рецензирования 16.10.2022; принята к публикации 24.10.2022.

The article was submitted 05.10.2022; approved after reviewing 16.10.2022; accepted for publication 24.10.2022.

РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Оригинальная научная (исследовательская) статья

УДК 614.76

<https://doi.org/10.17071/2410-8553-2022-2-16-38>

**Структурная энтропия как мера фракционирования массопотоков в экосистемах
в условиях транспортного прессинга**

Александр Петрович Хаустов¹, Маргарита Михайловна Редина²

^{1,2} Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

¹ khaustov-ap@rudn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5338-3960>

² redina-mm@rudn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3169-0142>

Аннотация. Анализируются особенности распределения полициклических ароматических углеводородов, рассматриваемых как геохимические маркеры массопереноса в структурных переходах «снег–почвы–растения» городских почвенно-растительных систем. Опытный импактный полигон – территория с интенсивным транспортным прессом – кампус РУДН с прилегающей зеленой зоной (юго-западный округ г. Москвы). Пространственная изменчивость полиаренов в средах и структурных переходах носит хаотический характер. Проведены расчеты выбросов полиаренов от сгорания топлива, истирания автошин, тормозных колодок и асфальта. Такое «наложение» загрязнения от внешних источников способствует интенсивной хаотизации структурных переходов в обозначенной системе. Оценена роль экстенсивных параметров (приращений энтропии, энергии Гиббса, энтальпии) в средах и различных структурных переходах. Акцентируется волновая природа воздействия автотранспортных средств как источников загрязнения. Информативные параметры фракционирования комплекса полиаренов – зависимости приращения структурной энтропии от коэффициентов транслкации во взаимодействующих компонентах. Аппарат термодинамики позволяет идентифицировать факторы и механизмы, определяющие накопление полиаренов в естественных и транспортно-нагруженных условиях. Методами группировок выделены подвижные и нейтральные пулы мигрирующих полиаренов в почвенно-растительной системе. Анализ миграции в неравновесной системе «снег–почвы–корни растений – стебли» с применением принципов термодинамики позволил выявить хаотичность процессов миграции и накопления. Ведущая роль в структуризации потоков полиаренов в приведенной системе отведена ризосфере. На основании изменчивости термодинамических параметров введено понятие структурной проточности систем. Это позволяет объективизировать процедуру оценок интенсивности антропогенных нагрузок и выявить участки почвенно-растительной системы с максимальным накоплением и с максимальной «пропускной способностью» по отношению к полиаренам.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), транспортная нагрузка, энтропия, массопотоки, Albic Retisols (Ochric)

Для цитирования: Хаустов А.П., Редина М.М. Структурная энтропия как мера фракционирования массопотоков в экосистемах в условиях транспортного прессинга // Антропогенная трансформация природной среды. 2022. Т. 8. № 2. С. 16–38. <https://doi.org/10.17071/2410-8553-2022-2-16-38>

SECTION 2. POLLUTION

Original paper

**Structural entropy as a measure of fractioning of mass-flows in ecosystems
under the influence of transport pressure**

Aleksandr P. Khaustov¹, Margarita M. Redina²

People's Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

¹ khaustov-ap@rudn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5338-3960>

² redina-mm@rudn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3169-0142>

Abstract. The features of the distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons considered as geochemical markers of mass transfer in the structural transitions of «snow–soil–plants» of urban soil-plant systems are analyzed. The experimental impact test site is an area with an intensive transport press – the RUDN campus with an adjacent green zone

© Хаустов А.П., Редина М.М., 2022



(south-western district of Moscow). Spatial variability of polyarenes in media and structural transitions is chaotic. Calculations of polyarene emissions from fuel combustion, tire abrasion, brake pads and asphalt have been carried out. Such an «overlay» of pollution from external sources contributes to the intensive chaoticization of structural transitions in the designated system. The role of extensive parameters (entropy increments, Gibbs energy, enthalpy) in media and various structural transitions is estimated. The wave nature of the impact of motor vehicles as sources of pollution is emphasized. Informative parameters of the fractionation of the polyarene complex are the dependences of the increment of structural entropy on the translocation coefficients in the interacting components. The thermodynamic apparatus makes it possible to identify the factors and mechanisms that determine the accumulation of polyarenes in natural and transport-loaded conditions. Mobile and neutral pools of migrating polyarenes in the soil-plant system were identified by grouping methods. The analysis of migration in the nonequilibrium system «snow-soil-plant roots – stems» using the principles of thermodynamics revealed the chaotic processes of migration and accumulation. The leading role in the structuring of polyarene flows in the above system is assigned to the rhizosphere. Based on the variability of thermodynamic parameters, the concept of structural flowability of systems is introduced. The introduction of the concept makes it possible to objectify the procedure for assessing the intensity of anthropogenic loads and to identify areas of the soil-plant system with maximum accumulation and with maximum «throughput» in relation to polyarenes.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), transport pressure, entropy, mass-flows, Albic Retisols (Ochric)

For citation: Khaustov, A., Redina, M., 2022. Structural entropy as a measure of fractioning of mass-flows in ecosystems under the influence of transport pressure. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 8(2). pp. 16–38. <https://doi.org/10.17071/2410-8553-2022-2-16-38> (in Russian)

Введение

В загрязнении Москвы доминируют нагрузки от автотранспортных средств (далее – АТС) с вкладом более 84% по валовым выбросам [9]. По некоторым данным, выбросы вредных веществ в почву от АТС составляют 1,2 кг/м² в год. Размер зоны влияния магистралей зависит от активности транспорта, специфики принимающих поллютанты компонентов систем и физико-химического состава выбросов. Традиционными исследованиями стараются охватить большие городские территории, где максимально представлено разнообразие источников загрязнения. Практически не уделяется внимания детальным (импактным) исследованиям, позволяющим проводить оценки трансформации загрязнителей на опытных полигонах. На основе полученных данных можно достоверно оценить траектории эволюции природных систем с фиксированными термодинамическими параметрами. Аппарат термодинамики в условиях хаотической многомерности свойств объектов позволяет выявить в системе «атмосфера–почвы–растения» возможные режимы структурного преобразования потоков веществ. Основная задача наших исследований – *разделение пространства импактного полигона на подмножества с различными типами структурирования массопотоков экологической системы под влиянием АТС.*

Транспортное загрязнение, помимо выделения газообразных и твердых продуктов сгорания от двигателей, включает привнос механической пыли в атмосферу, в том числе продуктов истирания шин автомобилей, асфальта, выделения твердых частиц при торможении. Частицы диаметром 1–10 мкм и менее (до 0.01 мкм) постоянно находятся в воздухе – это продукты деструкции каучуков и асфальта с активной реакционной способностью и чрезвычайно высокими токсичными свойствами. Среди них ПАУ, алифатические амины, углеводороды неароматического ряда; такие канцерогены как сероуглерод, фенольные соединения, формальдегиды, нитрозамины и другие. Помимо собственной токсичности, роль твердых час-

тиц (ТЧ) состоит еще в том, что они представляют собой ядра с формированием оболочки из окисленных прочных физико-химических комплексов, способных переноситься на большие расстояния и попадать в легкие человека. Считается, что это одна из приоритетных причин раковых заболеваний. Для усиления пластичности в автомобильные шины добавляют масла, чаще всего отработанные, или низкого качества, которые при взаимодействии с асфальтом (потенциальным поставщиком ПАУ в атмосферу) также выделяют полиарены. Несмотря на то, что наши оценки показали преобладание выхлопных газов как источника выделения ПАУ, роль шин также весьма значительна [21]. Акцент в нашем исследовании делается на ПАУ как геохимические маркеры. Это направление развивается с середины XX в., и к настоящему времени накоплен значительный опыт моделирования их процессов миграции [2, 7, 17, 30, 34, 35 и др.].

Исследования миграции углеводородов в почвах и растениях – актуальная проблема, связанная с их специфическим поведением в естественных и техногенных условиях [25]. Это явно видно при создании импактных моделей загрязнения, поэтому трудно найти оптимальное сочетание полиаренов, которые бы адекватно отражали состояние сред и позволяли провести сравнительный анализ поведения компонентов¹ в системе «атмосфера–почва–ризосфера (корни)–стебли растений». В данной цепи возникает режим переменной генерации массопотоков, который существенно меняется при переходах от одного структурного элемента к другому. Звенья цепи выпадают из массоэнергообмена в результате их сезонности функционирования, повреждения или угнетения техногенной нагрузкой. Количественные показатели этих процессов – интенсивность, механизмы поглощения, накопления или превращения (детоксикации) канцерогенов растениями в литера-

¹ В термодинамике под компонентом понимается вещество, которое может быть выделено из системы и существовать вне ее, т.е. компоненты – это независимые вещества [26]

туре представлены лишь в виде оценок отдельных связей, либо теоретических рассуждений, слабо подтвержденных фактическими данными.

Структурная энтропия рассматривается как характеристика систем к превращениям или эволюции. Необходимость введения этого понятия обусловлена современными представлениями в нелинейной термодинамике И. Пригожина об эволюции открытых неравновесных систем от хаоса к порядку. Следуя аксиоматике А.Н. Панченкова [16], хаос это «наполняющая пространство неразрывная сплошная среда»; хаос = «чистый хаос + структура» и «структура хаоса – оптимальная структура». Приведенные аксиомы и постулаты принципиально новы и требуют пояснений применительно к задачам – идентификации потока загрязнений в системе «почва–растения» на основе расчетов структурной энтропии. Важно, что хаос – это сплошная (не дискретная, как принято в классической механике), непрерывно изменяющаяся среда, в которой реализовано свойство систем – «повторение без повторений» (эффект Н.А. Бернштейна).

Объектом наших исследований является виртуальная (хаотическая) сплошная среда, а фундаментальным принципом оценки взаимодействия компонентов систем на данном отрезке времени – принцип максимума энтропии. Ключевую роль в Гамильтоновой механике играет импульс. Отсюда – энтропийное многообразие или многообразие фазового пространства, на котором поддерживается глобальная симметрия (закон сохранения энтропии по А.Н. Панченкову). Энтропию импульса он рассматривает как ресурсы системы, необходимые для ее строительства, развития и жизнеобеспечения.

По нашему мнению, эволюция систем определяется временем воздействия (взаимодействия) внешних и внутренних импульсов энергии или самоорганизацией. Иными словами, время – основной фактор эволюции (изменения макроскопического порядка при воздействии внешних сил) систем за счет самопроизвольного роста микроскопического беспорядка [23]. В переложении к живым системам этот постулат можно сформулировать так: любая живая система стремится к некоторому максимально высокому уровню энтропии (эктропии), после которого наступает ее разрушение. Стремиться к этому уровню можно с разной скоростью и, следовательно, момент разрушения будет варьировать во времени. Что понимать под разрушением? Переход в новое качество по каким-то репрезентативным выбранным параметрам, надежно отражающих изменение континуума?

Кроме изложенного, А. Н. Панченков считает, что состояние хаоса поддерживает фундаментальный принцип оптимальности взаимодействия компонентов системы. Откуда структура хаоса – *оптимальная структура, возникающая из хаоса*. Ниже методом группировок ПАУ будет подтверждено это фундаментальное положение.

Еще одно важнейшее обстоятельство – структурирование системы достигается комплексом свойств, а идентификация потоков энергии и вещества *многомерностью параметров или фазовых переменных*.

Именно по многомерной вариации переменных во времени и пространстве оценивается эволюция систем, не по отдельным показателям. Многомерность процессов в системе порождает структурные изменения (траектории), хаотичность и возникновение странных аттракторов, или точек качественных перестроек взаимодействия компонентов системы. Под *структуризацией* исследуемой системы мы понимаем образование форм движения и накопления углеводородов (или других веществ), а также промежуточных соединений с элементами сред или формостроительные процессы с различной специализацией от микро до макроформирований. Практически это реализация принципа «вещество – процесс» в каталитической системе на макроуровнях с различными концентрационными волнами, вследствие кооперативных явлений, что приводит к возникновению химических соединений.

При анализе техногенных нагрузок на природные объекты структурная энтропия может рассматриваться как условный фон, или срез состояния системы (инвариант, многомерное поле и т.д.), на который воздействует техногенный импульс (или их совокупность) рассредоточенный или сконцентрированный во времени и пространстве.

Почвы с экосистемных позиций представляют сплошную хаотическую среду (или интегральный инвариант, меру совершенства и упорядоченности) с выраженной сезонностью расхода и поступления вещества и энергии. Например, за счет опада и переработки растительности. Это естественные ресурсы почвенной системы с ярким проявлением *импульсно-резонансных процессов*, на которые накладывается более короткопериодные импульсы от АТС, что приводит к искажению естественных флуктуаций массопотоков в системе «атмосфера–почвы–корни–стебли растений».

Известно, что природой создаются системы далекие от равновесия и стационарности, что обусловлено диссипацией структурных переходов. Такой частный случай дихотомии гетерогенных систем приводит к созданию их нового порядка и вынужденных частот автоколебаний. Пригожинский принцип нелинейной динамики не всегда применим к таким системам, как и хаковская синергетика. Для систем выражена траектория движения от хаоса к порядку, или «стрела времени» в терминах И. Пригожина. Мы же исследуем преимущественно временные срезы состояния систем, по которым трудно объективно оценить, на каком временном отрезке находится система. Время определяет эволюцию систем, но в термодинамике оно в качестве независимой переменной не берется в расчеты. Парадокс? Что принимать за порядок или точку отсчета? Фоновые значения? Но природные системы неравновесны, а главное, кинетически необратимы, что определяет эволюцию всех процессов. Энергия поступает извне (и генерируется самой системой) в виде квантов, следовательно, и фон будет изменяться во времени и пространстве. Природные и фоновые «значения» параметров природных систем отнюдь не синонимы.

По А.Н. Панченкову, «хаотическая сплошная среда содержит основной (первичный) геометрический объект – фазовое пространство». Именно оно, по нашему мнению, формирует и перераспределяет потоки вещества и энергии в системе и, как следствие, *структурную биодоступность* веществ в экосистеме. Это свойство можно представить как «абсолютный интегральный инвариант или меру совершенства хаотической сплошной среды и ее структур».

Эволюционные уравнения состояния систем применимы преимущественно для детерминированных закрытых систем. Согласно современным представлениям [24], эволюция систем рассматривается как процесс самоорганизации, а направленность траектории их развития тяготеет в сторону *роста разнообразия форм структурной сложности* (энтропии). Такие переходы сопровождаются появлением новых связей элементов и исчезновением старых, вплоть до изменения типов и их функционального назначения. При техногенном воздействии маловероятно, что система вернется в прежнее состояние. Эффекты отклонений всегда будут отдаленные или вторичные, не фиксируемые инструментально.

По мнению авторов [20] центральное место в миграции токсикантов и самоочищении почв (следовательно, и биодоступности) имеет разделение жидких смесей в гетерогенных системах по схеме работы «параметрического насоса». Условно его работа базируется на взаимодействии двух синхронных периодических полей с распределением смесей веществ между твердой и жидкой фазой. Одно из полей (например температура) является управляющим параметром компонентов смеси между фазами, например, «корни–стебли». Другое синхронное поле (например, поверхностное натяжение) смещает одну из фаз или ее компоненту относительно другой в обратном направлении. В результате возникают встречные потоки против градиентов концентраций. Но массопотоки в средах направлены на выравнивание градиентов концентраций и данные процессы можно рассматривать как эффективные процессы фракционирования веществ. Они избирательны в зависимости от физических свойств субстанций в структурных взаимодействиях

Важно то, что осмотические свойства движения веществ в растениях или в пористых средах существенно снижают роль термодинамических сил в неравновесных системах. Массопотоки активизируют обратные связи между компонентами систем, давая толчок к их эволюции. Как правило, выделяют два генеральных пути поступления химических веществ из почв в высшие растения: через усвоение корнями и далее в стебли; усвоение потоков веществ наземной частью из атмосферы через кутикулы растений. Объемы потоков веществ с одной стороны контролируются молекулярной массой, с другой стороны гидрофобными свойствами соединений растений. Так или иначе, водная среда объединяет все части растительных организмов и структурные переходы веществ. В растениях водная фаза представляет собой непрерывную пульсирующую среду. Ее функции многообразны

и до конца не осознаны. Понятно, что вода – важнейший растворитель и среда для протекания биохимических реакций; участвует в упорядочивании структур в клетках на молекулярном уровне; метаболит и непосредственный компонент биохимических реакций; главный компонент в транспортной системе высших растений; терморегулирующий фактор и др. Перечисленные выше функции воды (раствора), кроме обеспечения *проточности системы*, обуславливают ремедиационные свойства растений.

С позиций термодинамики, чем большее разнообразие проявляют объекты, тем на большее число частей дифференцируется система, она становится более хаотичной и менее упорядочена ее функциональная структура. Иными словами, разнообразие элементов в системе стимулирует эволюцию и устойчивость к внешним воздействиям. Биодоступность химических элементов взаимодействующих сред, по нашему мнению, определяется структурностью и фазовыми переходами веществ в экосистеме. Существует достаточно много мнений по поводу данного термина, пришедшего из фармакологии. Обратимся к ГОСТ Р ISO 16198-2017 Качество почв. Метод определения биодоступности микроэлементов почвы для растений. Согласно стандарту в зависимости от условий реализации процесса различают:

- биодоступность из окружающей среды – количество загрязнителя, которое путем десорбции, имеющей физико-химический механизм, может потенциально накапливаться в растении;
- биодоступность из почвы – количество соединения, присутствующего в почве, которое поступает в организм растения в результате физиологических процессов;
- функциональная способность почвы поддерживать естественную среду, то есть поглощать загрязнители так, что они не могут быть удалены вымыванием водой или вовлечением в биоценоз через включения в пищевые цепи с участием организмов, обитающих в почве.

Биодоступность в почвенно-растительной системе может быть рассмотрена с синергетических позиций, в основе которых лежит выделение параметров порядка. Это небольшое число параметров сложной системы, к которым в процессе эволюции подстраиваются другие параметры (переменные). Например, трансформационная функция растворов. Независимо от знака энтальпии при растворении веществ происходит снижение производства энергии Гиббса за счет возрастания энтропии. Вполне естественно, что таким параметрами порядка массопереноса являются энергетические, обеспечивающие структурное взаимодействие компонентов системы. Следуя уравнению Гиббса-Гельмгольца, полная энергия открытой системы:

$$\Delta E = \Delta H = \Delta G + T\Delta S,$$

где: **E** – полная энергия системы, **H** – свободная энтальпия, **G** – свободная энергия Гиббса, **T** – абсолютная температура, **S** – энтропия. Знак Δ означает

производство энергии (энтропии) в открытых системах подвижного равновесия за счет необратимых процессов и энергомассообмена с окружающей средой.

Генерация неравновесной системой собственной энергии необходима для ослабления внешних воздействий надсреды. Отрицательные значения первых производных представляют собой результирующее изменение свободной энергии, или движущую силу процесса массообмена. Перемещение единицы массы из исходного положения в конечное сдерживается энергетическими барьерами. Поэтому до тех пор, пока она не приобретет необходимую избыточную энергию для прохождения через этот барьер, она остается в метастабильном состоянии. Наименьший прирост энергии, позволяющий веществу находиться в таком состоянии, характеризуется энергией Гиббса, поэтому она является функцией системы, связывающей энтальпию и энтропию.

Согласно Л. Больцману [5], наиболее хаотичным является состояние равновесия (порядка) в системе. Общий принцип заключается в том, что энергия превращается в тепло, как только она не упорядочена. И наоборот, беспорядок может существовать без энергии и становится теплом, как только заряжается энергией. Таким образом, для определения потока тепла необходимы два числа: одно – для измерения количества тепла, а другое – для измерения количества беспорядка. Количество тепловой энергии измеряется в калориях, а количество беспорядка измеряется энтропией. Энтальпия по определению – также функция состояния термодинамической системы (тепловая функция Гиббса), определяется как сумма внутренней энергии и произведения давления на объем. Это своего рода термодинамический потенциал системы. Изменение энтальпии (внутренней энергии) химической реакции зависит от вида, состояния, количества исходных веществ и продуктов реакции, но не зависит от направленности процесса. Стандартная энтальпия образования простых веществ близка к нулю для устойчивых модификаций при фиксированной температуре. Если реакция проходит при постоянном давлении, то ее тепловой эффект равен изменению энтальпии. Большинство организмов находятся в условиях относительно постоянного давления, поэтому уравнение Гиббса ($\Delta G = \Delta H - T\Delta S$) применимо к живым системам. Производные ΔG , ΔH и ΔS являются функциями состояния, а их значение во многом зависит от начальных и конечных концентраций веществ в системе.

Значения энтальпии можно также интерпретировать как энергетическую способность вещества к комплексообразованию, в том числе к биодоступному. К гетерогенным системам (а структурным переходам вещества в системе «почвы – растения» тем более), судить о постоянстве химических потенциалов веществ не приходится, поскольку равновесное состояние – предельный случай для открытых систем. Можно предположить, что усложнение структурных связей в открытых системах будет происходить именно за счет подвижных химических соединений (в на-

шем случае 2-4-кольцевых ПАУ) с возможным достижением относительного равновесия в системе «почвы–растения». Одновременно существуют инертные или малоподвижные соединения, это 4-6-кольцевые ПАУ. Важно то, что соотношение масс подвижных соединений к инертным указывает на смену интенсивности управляющих параметров состояния системы.

Подчеркнем вытекающие для наших проблем положения.

1. Для необратимых (эволюционирующих) систем $\Delta S > 0$; для обратимых процессов (существование которых маловероятно в природе – иначе бы не было эволюции) $\Delta S = 0$. Уход приращения энтропии в отрицательную область может свидетельствовать о наступлении в неравновесной системе некоторого условного (*текущего* по И. Пригожину), чаще кратковременного равновесия в координатах пространства. У нас нет временных вариаций состояния системы, поэтому об изменениях скоростей производства энтропии судить не приходится. Аналогично для энергии Гиббса; для самопроизвольных реакций $\Delta G > 0$, для синтеза упорядоченных структур $\Delta G < 0$, также характеризуется минимальной скоростью производства энтропии при метастабильном состоянии системы. При $\Delta G = 0$ в системе наступает наибольшая степень структурной неупорядоченности, а эволюция системы определяется экстремальными состояниями.

2. Перечисленные термодинамические характеристики по своей природе и методам расчета являются экстенсивными параметрами (зависящими от массы веществ, участвующих в фазовых переходах), которые во многом определяют биодоступность.

3. Согласно каноническому распределению Гиббса, основанному на известных постулатах статистики, «все доступные состояния системы равновероятны», можно оценить вероятность нахождения системы в возможных множественных микросостояниях, отвечающих какому-то определенному макроскопически тождественному условию.

4. Проблема исследования биосистем, названных «системами третьего типа» [10], ставит под сомнение возможности проявления устойчивости их компонентов. Доказательства неинвариантности свойств систем – несводимость значений автокорреляционных функций к нулевым отметкам, как и экспонент Ляпунова, не имеющих положительных значений. Логика подсказывает, что такие системы не могут быть аппроксимированы статистическими функциями распределения, поскольку они непрерывно изменяются. Отсюда основополагающий вывод: динамика поведения отдельного элемента биосистемы не может быть повторена (в отличие от технических и физических систем) ни детерминистски, ни стохастически. Структурная упорядоченность системы оценивается также с помощью энтропии, взятой с обратным знаком. В этом смысле энтропия Больцмана эквивалентна энтропии Шеннона.

По мнению [6] оценки хаоса и порядка в структуре дискретных систем должны оцениваться с помощью различных функций, значения которых отличались бы

величиной, а не знаком. Функции должны быть взаимосвязаны между собой, чтобы соотношение оценок хаоса и порядка изменялось по принципу сообщающихся сосудов. На наш взгляд, это утверждение физически обосновано, но такой процесс не обязательно пропорционален во времени для живых систем и прерываний структурных массопотоков.

Закономерен фундаментальный вопрос, который стараются обойти практически все исследователи. Что определяет эволюцию открытых систем или массопотоки веществ и, естественно, энергии? Микроскопические условия на уровне молекулярных ассоциаций, либо макровоздействия внешней среды на уровне импульсов (принцип Гамильтона в механике)? Чаще моделируется какой-то один признак с приведением его к нормализации, а не весь ансамбль возможных измеренных параметров. Это принципиально, поскольку индивидуальность поведения химических элементов формирует дисперсию или флуктуации самой системы, а это уже многомерная эволюция.

В представлениях о самоорганизации природных систем проблема структурирования приобретает центральную роль. Элементарные акты организации вещества, формируемые за счет фазовых переходов, позволяют создавать в системах иерархический каркас от микроформ к макро- и мегаформам. Поэтому синергетика экологических систем предполагает знание механизмов структурирования для оценки влияния факторов на процессы самоорганизации. При этом организующее начало имеет внешнее происхождение, а самоорганизация имеет внутренний генезис [22]. Очевидно, что такое деление Г. Хакеном во многом условно, и в силу инерционности процессов провести четкую грань между этими двумя явлениями нельзя. При изменении условий среды (управляющих параметров) и сохранении структуры она называется структурно устойчивой, при изменении структуры – относительно неустойчивой. Синергетика как раз фокусирует внимание на качественных *изменениях структурной неустойчивости*, вызванных изменением параметров управления.

Отметим, что в самоорганизующихся системах существует *иерархия переменных*, что определяет состояние системы и, следовательно, ее структурированность. Это формирует свои представления о категориях «хаоса» и «вечности» как атрибутов влияния соседних микро- и мега- уровней. При рассмотрении двух соседних уровней состояния принцип подчинения выражается следующим правилом: долгоживущие переменные управляют короткоживущими, вышележащий уровень – нижележащим [16].

Идентификацию процессов в таких системах проводят в понятиях «реакция – диффузия», то есть реакция всегда сопровождается переносом вещества в рамках характерного времени: цикла жизни и отмирания растений, переход биомассы в опад и почвенный слой. В структурных переходах временные отрезки переноса масс веществ сопоставимы и/или превышают динамическую составляющую характерных процессов. Согласно А.В. Смагину и

др. [18] реализуется процесс «игры связей» динамической системы или то, как тот или иной тип структурных и внешних связей системы влияет на ее пространственно-временную организацию и функционирование. В [19] наглядно продемонстрированы механизмы и модели этих процессов на примере такого стойкого ПАУ как бенз[а]пирен. Системы, в которых фиксируются разномасштабные изменения, принято называть распределенными системами. Для таких систем отношения местоположений элементов (или их групп) играют существенную роль с точки зрения функционирования системы. При внешнем воздействии (даже рассредоточенных источников – в нашем примере АТС) возможно образование регулярных согласованных в пространстве и времени осцилляций почвенно-растительных структур [35, 36].

Теоретические предпосылки рассмотрим на примере динамики концентраций ПАУ в системе фазовых переходов «снег–почвы–корни–стебли растений». Чаще всего для таких оценок применяется комплекс ПАУ из «стандартного» набора 16 полиаренов, включенных в перечень ЕРА [39]. Для локальных моделей трудно найти оптимальное сочетание полиаренов, позволяющее провести анализ поведения динамических компонентов в структурных переходах; индикаторные свойства ПАУ для разных процессов неодинаковы. В связи с этим анализируется комплекс ПАУ. В литературе неизвестны столь детальные геохимические модели структурирования загрязнения биогеоценозов на урбанизированных территориях.

Материал и методы

Объект исследования. Фактические данные получены на территории кампуса РУДН (юго-западный округ г. Москвы, Россия) с прилегающей лесопарковой зоной общей площадью около 114 га. Выбор объекта обусловлен хорошей изученностью и социальной значимостью территории (место проживания и работы более 10 тыс. чел ежедневно), а также четкой функциональной структурой территории с выраженными различиями условий поступления примесей. Территория окружена автотрассами и пересекается автодорогой с высокой интенсивностью движения, в том числе Ленинский просп. с годовой нагрузкой более 28.5 млн АТС/год; ул. Миклухо Маклая (7,8 млн). По данным камер наблюдений и специальных расчетов (на трассах без камер) это преимущественно легковой транспорт, использующий бензин в качестве топлива, а также небольшие доли грузовых автомобилей и городского пассажирского транспорта (автобусы). Состояние исследуемой территории отслеживается на 33 точках мониторинга по уникальной программе, разработанной в РУДН в рамках взаимодействия с UI GreenMetric. С 2017 года собрано более 4000 данных о загрязнении воздуха, снега, почв, состоянии растений по стандартным методикам мониторинга; оценены уровни акустической нагрузки, электромагнитные поля и радиационный фон. По этим данным обоснованы функциональные зоны:

транспортная (с максимальной нагрузкой), общественно-деловая и лесопарковая (условно-фоновая) [35, 36].

Наличие ПАУ¹ в компонентах экосистемы проводили стандартными методами отбора проб снега, почв и растительности, в соответствии с принятыми методиками. Повышенное внимание к пробоотбору связано с проведением нами специальных исследований, которые выявили активное выщелачивание ПАУ при хранении проб воды из полиэтиленовой посуды [34]. Установлено, что 10% суммарной погрешности анализа стойких органических загрязнителей в средах приходится на стадию измерения сигнала, 30% – на пробоподготовку и 60% – на пробоотбор [13]. Как справедливо указывают авторы, ошибка пробоотбора может достигать 100%, что обусловлено неравновесностью, неоднородностью, фазовыми различиями контролируемых сред. Для снега это крайне актуально, поскольку в условиях Москвы зимой нередки оттепели, приводящие к значительным вариациям запасов влаги в снеге с соответствующими фазовыми переходами среды, накапливающей ПАУ. Пробы анализировались в аккредитованном испытательном центре Нортест (г. Москва) в соответствии с Методикой ПНД Ф 14. 1:2:4.70-96.

Отбор проб снега проводился на 20 точках по специально рассчитанной равномерной сетке на участках 5×5 м методом «конверта» согласно руководствам РД 52.04.186-89, РД 52.04.86-89 (ч. 2), М 02-902-143-07. Пробы отбирали на всю мощность снегового покрова. Для каждой точки составлялась общая проба массой не менее 1 кг, которая помещалась в специальные контейнеры из химически стойкого стекла. По мере таяния проб воду фильтровали на фильтры «синяя лента», упаковывали в стеклянную посуду и помещали в холодильник [33].

Отбор проб почв и растительности проведен в октябре 2019 г. на 33 точках мониторинга в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017 методом конверта поверхностного слоя почвы на глубине 5-10 см. Почвы на территории лесопарка преимущественно дерново-средне – сильноурбоподзолистые слабо-средне-нарушенные на моренном покровном суглинке (в соответствии с [32] – Albic Retisols (Ochric)); на территории кампуса – в разной степени нарушенные урбаноземы гумусированные слабо-среднемошные на суглинке [32]. Пробы растительности представлены мятликом луговым (*Poa pratensis*, произрастает в районе лесопарка), и красной овсяницей (*Festuca rubra*, произрастает вдоль автотрасс и в административной зоне), отобраны согласно ГОСТ 27262-87. Растения близки по систематическим группам и, предположительно, проявляют сходные реакции на влияние загрязнений, включая ПАУ.

Химический анализ проб почв и растительности на содержание ПАУ проведен согласно ПНД Ф 16.1:2:2.2:3. 39-03 методом ВЭЖХ. Извлечение ПАУ из проб почв и растений осуществляли методом экстракции субкритическими растворителями с помощью системы ASE-350 (Dionex Corporation, США). Анализ концентраций проводился с на жидкостном хроматографе Люмахром ООО «Люмекс», с пламенно-ионизационным FID детектором, колонка Supelco, LC PAH 5 мкм (25 см× 2.1 мм), термостатированной при 30°C; подвижная фаза – ацетонитрил – вода. Весь аналитический объем работ был выполнен на базе Института биологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар). Методы пробоподготовки и химического анализа почв и растительности детально рассмотрены в [36].

Анализ миграционной активности ПАУ проводился для каждой пробы на основе показателя токсичности TEF по разности значений в принимающей и отдающей средах. Сам показатель представляет значение концентрации ПАУ, скорректированное с учетом его относительной опасности по сравнению с ВаР. Предполагается, что токсическая и мутагенная опасность полиаренов различается на порядки. Соответственно, и характеристика TEF рассчитывается как произведение фактической концентрации полиарена на величину TEQ (эквивалента токсичности) [38]. Например, для Naph TEQ=0.001. Таким образом,

$$\Delta TEF_{Naph \text{ снег-почва}} = TEF_{Naph \text{ почва}} - TEF_{Naph \text{ снег}} = TEQ_{Naph} \cdot (C_{Naph \text{ почва}} - C_{Naph \text{ снег}}).$$

Важна закономерность: естественная токсичность растворов во многом зависит от подвижности соединений в средах.

Для анализа энергетики процессов миграции и структурных переходов ПАУ рассчитаны приращение термодинамических характеристик. Оценки приращения (производства) энтропии ассоциаций ПАУ в системе «атмосферные выпадения–почва–растения» молекулярные энтропии отдельных ПАУ суммировались с учетом их содержания в соответствующей среде; приращение энтропии оценивалось как разница между полной энтропией принимающей и отправляющей среды. Например, для условий взаимодействия «почва–корень», определены концентрации Naph и Flu в средах, расчет проводится по уравнению:

$$\Delta S = S^{\circ}_{Naph} (C_{Naph \text{ root}} - C_{Naph \text{ soil}}) + S^{\circ}_{Flu} (C_{Flu \text{ root}} - C_{Flu \text{ soil}}),$$

где S°_{Naph} , S°_{Phen} , S°_{Flu} – стандартная энтропия образования соответствующего ПАУ, Дж/(моль · К); $C_{Naph \text{ soil}}$, $C_{Naph \text{ root}}$, $C_{Flu \text{ soil}}$, $C_{Flu \text{ root}}$ – молярные концентрации ПАУ в почве и корнях соответственно, нг/моль. Аналогичным образом проведены расчеты приращений энергии Гиббса, энтальпии газовой и твердой фаз для всего набора ПАУ.

¹ Нафталин (Naph), флуорен (Fl), фенантрен (Phen), антрацен (An), флуорантен (Flu), пирен (Py), бенз(а)антрацен (BaA), хризен (Chr), бенз[б]флуорантена (BbFlu), бенз[к]флуорантен (BkFlu), бенз[а]пирен (BaP), дибенз[а, h]антрацена (DbA), бенз[ghi]перилена (Bghi), индено[1,2,3-сd]пирена (IP)

Результаты и обсуждения

1. Оценка интенсивности транспортной нагрузки. Исследования [4] позволили классифицировать интенсивность движения на участках 1-3 как *высокую*, что определяет соответствующий уровень нагрузки. Расчет максимального разового и валового выброса в атмосферу для оценки зон влияния АТС (определялся как зона с концентрациями загрязнителей выше 0.8 ПДК). Только для ул. Миклухо-Маклая (участок 1) в районе кампуса суммарные выбросы автотранспорта составили 64.1 т/год; из них максимальное значение приходится на оксид углерода (50.8 т); бензин (5.59); азота диоксид (4.71 т). Приоритетными загрязнителями также выступают диоксид серы, оксиды азота, сажа и ТЧ.

Полиарены и другие загрязнители поступают с отходящими газами двигателей внутреннего сгорания (ДВС), а также в виде сложных сорбированных комплексов на ТЧ. Частицы различного состава, размера и формы имеют разный сорбционный потенциал. Они образуются при истирании шин и протекторов, дорожного полотна, тормозных колодок и дисков колес. Недочет таких образований в загрязнении сред приводит к существенным искажениям роли АТС и является крайне актуальной экологической проблемой. В связи с отсутствием непосредственных замеров образования ТЧ использованы ограниченные литературные данные по удельному образованию ТЧ и выбросам ПАУ [1, 12, 31, 37]. В зависимости от интенсивности транспортной нагрузки на участках автодорог выбросы ПАУ распределились следующим образом (рис. 1 / fig. 1).



Рис. 1. Схема участков автотрасс в районе кампуса РУДН







Условные обозначения:  – точки мониторинга;  – функциональные зоны: 1 – лесопарковая (фондовая), 2 – социально-административная; 3 – транспортная;  – участки автотрасс: 1 – ул. Миклухо-Маклая; 2 – Ленинский просп., 3 – Ленинский просп., 4 – ул. Акад. Опарина; 5 – ул. Саморы Машела

Fig. 1. Scheme of sections of highways in the area of the RUDN University campus

Symbols:  – monitoring points;  – functional zones: 1 – forest-parc (background) zone, 2 – social & administrative zone; 3 – transport zone;  – sections of highways: 1 – Miklukho-Maklaya str.; 2 – Leninsky highway, 3 – Leninsky highway, 4 – Academician Oparin str.; 5 – Samora Machel str.

С учетом интенсивности транспортных потоков суммарное количество выбросов ТЧ от всех АТС со-

ставляло 320.6 т/год. Распределение выбросов показано в таблице 1 / table 1.

Таблица 1

Характеристики транспортной нагрузки в районе кампуса РУДН

Table 1

Characteristics of the transport load in the area of the RUDN campus

Характеристика // Characteristic	Участки // Plots				
	1	2	3	4	5
Протяженность, м // Length, m	1000	1000	1180	430	1100
Ширина дорожного полотна, м // Width of the roadway, m	14.5	35.0	35.0	8.5	8.5
Интенсивность движения, млн. АТС/год // Traffic intensity, million ATS/year	7.8	28.5	27.1	1.6	5.1
Выбросы ТЧ, т/год, в т.ч. // PM emissions, t/year, incl.:	33.57	122.54	137.32	2.94	24.29
– с отработанными газами // with exhaust gases	0.10	0.37	0.41	0.01	0.07
– от истирания шин // from tire abrasion	1.46	5.33	5.97	0.13	1.06
– при торможении // when braking	0.20	0.72	0.68	0.04	0.13
– от истирания дорожного полотна // from abrasion of the roadway	31.8	116.13	130.25	2.76	23.03
Выбросы ПАУ, кг/год // PAH emissions, kg/year	22.64	82.63	92.68	1.96	16.39

Оценки образования ТЧ от эксплуатации транспорта в районе кампуса отчетливо указывают на преобладающую роль процессов истирания асфальта шинами, на которые сорбируются выхлопы продуктов ДВС в том числе и ПАУ. Их суммарный макси-

мальный выброс ПАУ без учета розы ветров для расчетных участков составил 216.3 кг/год. При площади полигона 114 га то соответствует 0.19 г/м².г. (таблица 2 / table 2).

Таблица 2

Оценка поступления ПАУ с выбросами автотранспорта в районе кампуса РУДН

Table 2

Assessment of PAH intake with vehicle emissions in the area of the RUDN campus

Источник поступления ПАУ // Source of PAH receipt	Выбросы // Emissions	
	кг/год // kg/year	% от суммарного // % of total
В отработанных газах двигателей, в т.ч.: // In the exhaust gases of engines, including:	123.2	58.02
Легучие // Volatile	115.8	54.60
На твердых частицах ДВС // on solid particles of internal combustion engines	7.4	3.42
На твердых частицах от дорожного покрытия // On solid particles from the road surface	92.8	42.90
На твердых частицах от тормозных колодок и колесных дисков // On solid particles from brake pads and wheels	0.03	0.01
На твердых частицах от износа шин // On solid particles from tire wear out	0.18	0.08
ИТОГО // TOTAL	216.3	100.00

По отношению к приведенным выше данным для Москвы вклад ТЧ составит 23.3%, ПАУ – 0.16 %, что в принципе реально для приближенных оценок расчетными методами. Среди выбросов ПАУ преобладают газообразные вещества в составе отработанных газов двигателей внутреннего сгорания (53.6%), а также ПАУ на частицах, поступающих от истирания дорожного полотна (42.9%). Таким образом, преобладающей формой распространения ПАУ является газовая фаза, а также выбросы от ДВС с сорбцией на частицы выхлопа и на ТЧ дорожного покрытия. Учитываемый химический состав асфальта, не исключено также поступление ПАУ за счет нагрева при торможении транспорта и при испарении.

Согласно взглядам Л. Больцмана [5] все процессы в природе направлены в сторону увеличения неупорядоченности или максимизации энтропии. Процессы торможения, если их рассматривать с позиций термодинамики, создают резкий рост степеней свободы. Трение шин об асфальт, нагрев приводят к спонтанному возникновению хаотичности атомов во взаимодействующих средах как следствие тепловых колебаний. Поэтому так велика роль тормозного пути АТС

на остановках и светофорах в формировании суммарных нагрузок ТЧ и ПАУ. Именно здесь зафиксированы максимальные концентрации многокольцевых ПАУ в почвах и растениях, поскольку для их мобилизации из шин и асфальта требуется повышенная энергия в виде импульсов. Этим же продиктовано выделение таких функциональных зон в отдельную категорию при оценках влияния автотранспорта.

2. Оценка пространственных вариаций ПАУ во взаимодействующих средах. С целью оценок состояния континуума сред (как непрерывного образования хаоса) и идентификации подвижности переходных структур проведен анализ группировок полиаренов во взаимодействующих средах на основании кластер-анализа.

2.1. Накопление в снеговом покрове. Для снегового покрова диапазон изменений суммы ПАУ составляет 129.5–1857.8 нг/г со средним значением 1351.1 нг/г. На основании значений концентраций ПАУ выявлены следующие группировки взаимосвязанных полиаренов:

– тесно связанная группа: BbFlu и BkFlu (типичный пул ПАУ от загрязнения сред АТС), к которой

примыкают Flu и Phen, а затем BaP, Chr, Py, Bghi, BaA;

– Ip, DbA, Fl, Naph – наименее связанная условная группа;

– An – независим по отношению к другим ПАУ.

2.2. Миграция в системе «снег–почвы». Структурные переходы в системе «снег–почвы» имеют локальный характер. Активные переходы ПАУ в почвы зафиксированы преимущественно в местах интенсивного торможения, разгона и прогрева автотранспорта (светофоры, остановки, стоянки на территории кампуса). Группировки структурных переходов ПАУ хорошо подтверждают отмеченное:

– максимально тесно связана группа: BkFlu, BbFlu, BaP, Chr, IP, DbA, BaA (лидер по переходам), – 4-6-кольцевые ПАУ техногенного происхождения (пирогенный генезис), к группе примыкают Fl и Bghi;

– следующая группировка: Py, Phen, Flu – 3-4-кольцевые ПАУ, типичные для самых различных источников загрязнения, в том числе естественных;

– независимы An (3 кольца, минимальная растворимость) и Naph (2 кольца, максимальная растворимость), но в снеге содержания были ниже предела обнаружения.

Важно отметить, что группировки отдающей среды и принимающей практически идентичны, что свидетельствует о том, что термодинамические параметры, при таком взаимодействии сред, должны иметь максимальные отрицательные значения термодинамических параметров. Еще одна закономерность – переход многокольцевых, малоподвижных ПАУ техногенной природы. Такой эффект возможен при сильнейшем антропогенном прессе, вызванном накоплением продуктов выбросов от ДВС и асфальта. Представители этого пула имеют выраженную молекулярную стойкость к внешним источникам воздействия. При снеготаянии они сохраняют идентичные молекулярные группировки переходов в почвенный слой, и, как следствие, надежно идентифицируют локальное загрязнение. Часть ПАУ, оставшихся на поверхности почв, может быть законсервирована опадом растительности, либо удалена поливами и дождями. Кратковременный импульс взаимодействия сред накладывает ограничительные рамки на развитие удобных молекулярных форм перехода и образованию соединений ПАУ через взаимодействие с верхним слоем почв. С этих позиции накопление ПАУ и других поллютантов в снеге наиболее токсично для биогеоценозов.

2.3. Накопление в почвах. Диапазон изменений суммы ПАУ в почвах составил от 39.8 до 2542.9 нг/г с аномальной концентрацией в т. 9 (23936.3 нг/г). Среднее содержание ПАУ на территории кампуса и прилегающей лесопарковой зоны составляет 1022.4 мкг/кг. Преобладающие ПАУ: Py (16.1%) > Flu (15.7%) > BbFlu (11.7%) > BaP (10.6%); содержание прочих соединений ниже 10%. Преобладающие ПАУ – это 4-кольцевые соединения (молекулярная масса 202) и 5-кольцевой BbFlu. При этом BbFlu является репрезентативным индикатором АТС в почвах [14, 36]. Состав этого пула свидетельствует о ярко выраженном пирогенном загрязнении; в чистых почвах

преобладают преимущественно Naph, Flourene, Phen, а для гумусовых горизонтов еще и безз[ghi]перилен (Bghi).

Анализ взаимосвязей ассоциации ПАУ в почвах на основе кластерного анализа показал, что полиарены четко разделяются на группы согласно их молекулярным массам: Naph (обособлен от всех ПАУ); группа 3-4-кольцевых; группа 5-6-кольцевых.

2.4. Структурные переходы в системе «почвы–корни». Общеизвестно, что «жизненный цикл» поллютантов в системе «почва–растение» включает их поглощение корнями растений, ремиссию, миграцию и деградацию в почвах. Поглощение органических поллютантов корнями растений из почв чаще представляется как функция растворимости веществ в воде, содержания органического вещества в почвах и вида растения. Особенности распределения поллютантов по органам растений чаще относят к эволюционным свойствам растительности сохранять в тканях метаболически приемлемые (комфортные) концентрации химических элементов.

Низкомолекулярные ПАУ обладают сравнительно высокой окисляемостью, высокомолекулярные окисляются слабо, или же совсем не окисляются. У высших растений, наряду с поглощением ПАУ из почвы, возможен внутриклеточный синтез их в самих растениях. Подтверждением тому является наличие Fl, Naph, An, BaA, Bghi в растениях, которые исходно отсутствовали в почве. DbA из почвы не поглощается растениями и не синтезируется в растительности. Теоретически распределение ПАУ имеет выраженную базипетальную направленность – увеличение их концентраций от корней к листьям. Возможное, снижение накопления ПАУ растениями объясняется включением их защитных функций на повышенные концентрации загрязнителей. Известно, что при определенных концентрациях ПАУ в почве они могут обволакивать корень растения и препятствовать дальнейшему поглощению полиаренов из почв.

При классифицировании структурных переходов характерны более сложные и разобщенные группировки ПАУ, что свидетельствует об усложнении взаимодействия компонентов экосистемы. Происходят качественные преобразования (сортировка) компонентов массопотоков для дальнейшего продвижения в стебель. По своей сути ризосфера обеспечивает биодоступность почвенных растворов для растений. Достаточно четко выделяются:

– Naph как ПАУ с наиболее специфическим поведением за счет максимальной растворимости в воде и поэтому с наибольшей активностью;

– Остальные 3-6-кольцевые, которые подразделяются на следующие подгруппы:

- Fl, Phen – максимально легкие и растворимые;
- An и 4-кольцевые Py, Flu, Chr, BaA;
- 5-кольцевые BaP, BkFlu, BbFlu;
- 6-кольцевой Bghi.

Ведущая роль ризоремедиации наглядно указывает на подключение более сложных механизмов миграции и более затратных по энергетическим параметрам. Эмпирические значения увеличения термо-

динамических параметров при структурных переходах по сравнению с переходами «снег – почвы» достигают по экстремальным значениям нескольких сотен и десятков раз. Дифференциация ПАУ, как способность к саморегуляции, здесь достигает максимума и по данным специальных расчетов в корнях переходят только Naph и Fl, хотя в почвах доминируют совсем другие представители ПАУ. Судя по высоким содержаниям пирогенных ПАУ в почвах, проявляется особый вид техногенеза, в котором насыщение почв многокольцевыми ПАУ достигает предела и происходит их массовое связывание гуминовыми и фульвокислотами. В почвоведении эти процессы принято рассматривать как спонтанную самоорганизацию. Тем не менее, для ее проявления требуется определенное время. Naph и Fl, имея относительно более высокую растворимость, связываются наиболее быстро, трансформируясь в более подвижные формы, и мигрируют в ризосферу. Однако это совсем не означает, что они перейдут в стебли растений.

2.5. Накопление в корнях растений. Оценки проведены также в тех же точках, но сумме ПАУ концентрации практически в 3 раза ниже по сравнению с почвами: диапазон этих значений составил от 88.5 до 1316.6 нг/г при среднем значении 302.6 нг/г. Наиболее значительные концентрации имеют Naph (18.1%) > Phen (17.8%) > Flu (11.8%) > Py (10.9%). Концентрации прочих ПАУ составляют менее 10%. Перераспределение функционального ряда можно объяснить, более интенсивной биодоступностью пула ПАУ с относительно небольшими размерами молекул (2–4 кольца). Группировки по концентрациям ПАУ в корневой части растений также распределились согласно молекулярным массам:

- легкие: Naph, Fl, An, Phen;
- более тяжелые 4-5 кольцевые (BbFlu, Chr, BkFlu, BaP, BaA, Py, Flu) и 6-кольцевые (Bghi и IP, DbA).

2.6. Структуризация потоков при переходах из корней в стебли. Потоки наиболее упорядочены по молекулярным массам и растворимости ПАУ:

- легкие (2-3 кольца): Naph, Fl, An, Phen максимально устойчивая группировка, к которой примыкают с более слабыми связями 5- и 6-кольцевые DbA и IP;
- Bghi (максимально удален), но тесную связь проявляют 4-5-кольцевые (Flu, Py, BaA, BaP, Chr, BbFlu, BkFlu);
- более тяжелые подразделяются на подгруппы 4-5-кольцевых (BbFlu, Chr, BkFlu, BaP, BaA, Py, Flu) и 6-кольцевых (Bghi и IP).

Классифицирование ПАУ по структурным переходам наглядно указывает на преобразующую функцию ризосферы в доступную форму для самого широкого спектра полиаренов с дальнейшей их миграцией в стебли. Однако реальными расчетами выявлен переход лишь для следующей ограниченной активности группы ПАУ: Phen >> Fl > An.

2.7. Накопление ПАУ в надземной части растений. Среднее содержание значений суммы ПАУ в

аэральная часть растений составляет 294.5 мкг/кг, а среднее содержание индивидуальных ПАУ убывает в ряду Phen (25.2%) > Naph (16.1%) > Flu (11.6%) > Py (10.3%). Внутри ассоциации ПАУ выделяются следующие группировки:

- легкие 2-3-кольцевые Naph, Fl, Phen;
- более тяжелые 4-6 и An:
 - 3-4-кольцевые An, Fu, Py;
 - более тяжелые 4-5-кольцевые BaA, BkFlu, BbFlu, BaP, Chr, Bghi;
 - DbA.

Разнообразие группировок ПАУ по сравнению с корнями можно объяснить частичным приходом ПАУ в растения из атмосферы: упорядоченный корнями поток (определяемый в значительной степени свойствами растений) дополняется поступлениями поллютантов из атмосферы, отчетливо определяемых в отдельных точках наблюдений.

Резюмируя, приведем осредненную схему *структуризации продвижения* ПАУ во взаимодействующих средах при активных нагрузках АТС:

- «снег–почва»: BaA > Bghi > BaP > BbFku > An > BkFlu;
- «почва–корни»: Naph > Fl;
- «корни–стебли»: Phen >> Fl > An.

3. Оценка факторов активности миграции в структурных переходах ПАУ.

Оценка пространственной активности миграции ПАУ через границы «снег–почва», «почва–корень», «корень–стебель» проводилась с учетом точек мониторинга, где наблюдается их перемещение. Для границы «снег–почва» рассматривались 19 точек; для остальных границ – 33. Принималось, что ПАУ мигрирует через границу, если концентрация в «принимающей» среде превышает концентрацию в «отдающей». Как правило, оценки проводятся с применением транслокационных коэффициентов (КТ). По нашему мнению, коэффициент является одним из наиболее информативных, реальных и фундаментальных параметров оценки интенсивности структурных переходов. Параметр широко используется для оценки взаимодействия сред, физиологической роли химических элементов, выявления их участия в биотическом круговороте, роли организмов-индикаторов и организмов-концентраторов.

С позиций структурного взаимодействия КТ в первую очередь характеризует возможности миграционных процессов. В термодинамике важно то, что в процессе биогенной миграции происходит специфический отбор различных пулов химических элементов. Это убедительно доказано методом генетических группировок выше. Включение в систему «атмосфера–почва–растения» новых растворенных соединений приводит к нарушению естественных физико-химических равновесий. Следовательно, будут изменяться и условия среды, то есть подключатся механизмы обратных связей, сопровождаемые структурной перестройкой. Часто в абсорбции участвуют относительно подвижные элементы, для ПАУ это 2-4-кольцевые полиарены. В условиях техногенеза этот принцип может нарушаться [25, 36]. Гетерохронность мигра-

ционных процессов веществ, по сравнению с гетерогенной средой, – относительно быстрое явление, поэтому вполне реален эффект запаздывания. Каждая среда имеет свои пределы накопления поллютантов, что предопределяется также величиной КТ.

На основании КТ обычно выделяют группы растений по шкале интенсивности накопления химических элементов. Группа сильного захвата – наземные древесные растения, группа слабого захвата – зерновые культуры и очень слабого захвата – корне- и клубнеплоды. Объекты наших исследований, злаковые растения мялик луговой (*Poa pratensis*) и овсяница красная (*Festuca rubra*) можно отнести к группе слабого захвата.

Л.И. Белых [3] были разработаны стандартизированные КТ ПАУ для злаков и ботвы картофеля,

основанные на том, что накопление ПАУ в растениях зависит от концентрации полиаренов в почве. Выявлено, что с увеличением концентрации вещества в почве наблюдается экспоненциальное уменьшение КТ.

Нами сравнительная активность миграции оценивалась по «рейтинговой оценке»: для каждого индивидуального ПАУ суммировались доли точек, где выявлен переход, а затем ПАУ выстраивались в порядке убывания накопленной части точек с подтвержденной миграцией с учетом точности анализа до 30%. Полученный ряд снижения активности миграции был разделен на 3 интервала: активно мигрирующие ПАУ; мигрирующие; слабо мигрирующие. Характеристики полученных групп приведены в таблице 3 / table 3.

Таблица 3

Пространственная характеристика активности миграции ПАУ при структурных переходах

Table 3

Spatial characteristics of PAH migration activity during structural transitions

Мигрирующие ПАУ // Migrating PAHs	Структурные переходы // Structural transitions						«Рейтинг» переходов ПАУ // «Rating» of PAH transitions
	Снег–почва // Snow–soil		Почва–корень // Soil–root		Корень–стебель // Root–stem		
	Δ ПАУ _{средн} мкг/кг // Δ PAH _{average} mcg/kg	% точек с переходом // % of transition points	Δ ПАУ _{средн} мкг/кг // Δ PAH _{average} mcg/kg	% точек с переходом // % of transition points	Δ ПАУ _{средн} мкг/кг // Δ PAH _{average} mcg/kg	% точек с переходом // % of transition points	
Активно мигрирующие // Actively migrating							
Phen	–48.0	21.0	–9.7	87.9	20.54	84.8	194
Naph	14.3	52.6	27.5	90.9	–7.49	33.3	177
An	–8.4	31.6	–10.6	69.7	0.47	60.6	162
Мигрирующие // Migrating							
BaA	144.1	73.7	–73.6	27.3	–3.01	42.4	143
Py	25.0	36.8	–132	39.4	–2.5	63.6	140
IP	107.0	21.1	–261	62.5	5.88	54.5	138
Chr	94.0	42.1	–61.5	30.3	–0.92	63.6	136
Слабо мигрирующие // Weakly migrating							
BaP	161.8	63.2	–90.5	21.2	–5.06	36.4	121
Bbflu	160.7	52.6	–97	27.3	–5.31	39.4	119
BkFlu	57.0	57.9	–33.8	27.3	–1.82	33.3	118
Bghi	75.0	57.9	–58.2	37.9	–3.68	21.2	117
Flu	–451.5	15.8	–124.3	36.4	–1.52	63.6	116
DbA	2.9	15.8	–6.3	63.2	–0.39	34.8	114
Fl	3.2	5.3	3.2	93.9	0.52	6.7	106

Первая группа – наиболее легкие ПАУ, способные хорошо мигрировать в организме растения (3-кольцевые An и Phen), а также через барьер «почва–корень». Вошедший в группу Naph, учитывая его относительно высокую растворимость, также активно мигрирует через границу «снег–почва». Антрацен, благодаря форме молекулы и специфическим физико-химическим свойствам, слабо растворим в воде и менее доступен для растительности. Его миграционные возможности минимальны исключительно в силу его молекулярных свойств. Однако для

системы «почва–корень» и «корень–стебель» он оказался миграционно активным, что вызвано, очевидно, особенностями механизма транспорта (определяющую роль перестает играть исключительно растворимость в воде).

Отсутствие перехода в системе «почва – корни» отмечено в 24% случаев; возможен переход в 40%; выражен в 36% наблюдений. В системе «корни–стебли» такое соотношение резко изменяется и составляет, соответственно 6, 64 и 30%. Для снега это соответственно 63, 16 и 21% Приведенные циф-

ры вполне реалистичны; они свидетельствуют о сохраненном потенциале самоочищения в системе «почвы–растения» в условиях высоких нагрузок АТС. В тоже время соотношения указывают на ведущую роль хаотической структуризации массообмена под действием техногенеза.

Среди вероятных причин дифференциации пула ПАУ на группы с различной интенсивностью структуризации – экстенсивные зависимости свойств ПАУ от их массы, структуры и размеров молекул. Отсюда – их фракционирование может быть обусловлено изменениями *внутренних физико-химических (молекулярных) свойств*. Внешняя среда (влажность, температура почвенные растворы и др.) также создают необходимый автоколебательный фон нелинейных преобразований внутренней энергии в энергию незатухающих колебаний массопотоков. В современном естествознании колебания рассматриваются как естественный путь обмена и передачи энергии (например, пульсация крови у человека). Ритмы и резонансы в контактирующих средах *создают морфологическую волну, что существенно изменяет время эволюции природных систем*. Это принципиальный вывод, позволяющий интерпретировать многие процессы импульсного концентрирования веществ в средах и превращения энергии с термодинамических позиций. Подвижность и миграция ПАУ из одних сред в другие обусловлены также синергетическим влиянием самих сред – пористостью, температурой и липофильностью и др. Например, низкие концентрации ПАУ в снеге регулируются временем контакта с атмосферными осадками, в тоже время за период его существования в нем накапливаются значительные объемы поллютантов в том числе ПАУ [31].

Разнообразие временных интервалов, за которые достигается максимальное накопление ПАУ, синергизм образования градиентов концентраций при взаимодействии сред создает *структурное неравновесие*, обязательное для всех природных систем. Концентрирование веществ в структурных переходах может происходить за счет микроэффектов в каждой из сред при относительном постоянстве макрофакторов (гравитация и др.). Почвы имеют свои пределы насыщения ПАУ, хотя их способности к «переработке» поллютантов выше, чем у прочих сред в силу компонентного разнообразия. Максимум депонирования, помимо липофильности ПАУ, контролируется эффективным диаметром минеральной матрицы. Ризосфера – специфическая подсистема, контролирующая избирательные поступления ПАУ из почв в стебли; своего рода «фильтр», регулирующий мини массопотоки в стебли.

Анализ структуризации ПАУ во взаимодействующих средах при активных нагрузках АТС указывает на уход из системы преимущественно легких ПАУ; тяжелые пирогенного генезиса аккумулируются почвой и избирательно переходят в корневую часть растений. Такой механизм фазово-структурных переходов приводит к повышению содержания ПАУ в верхнем горизонте и интенсификации деятельности

углеводород-окисляющих микроорганизмов. При повышении температур почв и влажности они утилизируют большую часть поступивших полиаренов и других органических загрязнителей. Не последнюю роль имеют процессы связывания ПАУ гуминовыми и фульвокислотами. Повышенное содержание кислорода в их составе позволяет именно их считать активными углеводород-окисляющими спонтанными соединениями, формирующими хаотические концентрации в средах и структурных переходах растворов ПАУ. Общеизвестно, что биодоступность веществ для растений зависит от гидрофобности и молекулярной массы. Чем меньше молекулярная масса вещества, тем активнее поступают и продвигаются соединения по растительному организму. Углеводороды (как гидрофобные соединения) слабо проникают в корни растений, но по сравнению с гидрофильными веществами, они лучше сорбируются кутикулой на поверхности зеленых побегов растений из воздуха [15].

В целях оценки усвоения почвами и растениями химических веществ активно применяется коэффициент распределения октанол–вода ($\lg K_{ow}$), представляющий собой десятичный логарифм отношения концентрации вещества в октанолу к концентрации этого вещества в воде. Считается, что при значениях этого коэффициента более 3.0–5.0 вещества не проникают в корни растений, связываясь на их поверхности [15]. Теоретически такие ПАУ как нафталин ($\lg K_{ow}=3.30$), Ace (3.60), Fl (4.18), Phen (4.46), Py (4.88), Flu (4.90), Chr (5.79) BaP (6.06) не должны проникать в стебли растений из почв, связываясь на границе корней. Многочисленными опытами и измерениями доказано, что общее количество ПАУ всегда присутствует в растениях от десятков нг до сотен мкг на грамм растительности [3, 27, 28, 35 и др.].

По данным [29] увеличение в почве концентраций ПАУ в 630 раз приводит к повышению содержаний их в стеблях всего в 4–13 раз. Тем не менее, несмотря на приведенные выше аргументы, высокомолекулярные ПАУ фиксируются в стеблях. По-видимому, существуют механизмы миграции ПАУ, которые не объясняются только гидрофобностью и молекулярной массой. В тоже время, именно гидрофобностью углеводородов можно объяснить их слабое проникновение в корневую систему, что может реально влиять на водный режим растений.

Расчет термодинамических характеристик гуминовых кислот для загрязненных дерново-подзолистых почв [15] указывает на то, что в результате термокаталитического окисления образуются гуминовые кислоты с высокой энтропией образования, энтальпией теплоты сгорания и соответственно свободной энергией по сравнению с незагрязненными почвами.

Далеко не последнюю роль в формировании таких молекулярно «разупорядоченных» кислот с повышенной реакционной активностью могут играть ПАУ, в силу их высокой способности к замещению могут включаться в состав гуминовых кислот. По такой схеме может происходить существенное депони-

рование потоков ПАУ, что отражено в табл. 3 в виде отрицательных значений.

Для определения роли ведущих параметров миграции ПАУ (ΔG , ΔH , $\Delta H_{\text{газ}}$, ΔS , $\lg K_{\text{ow}}$) в процессы структуризации рассчитывались коэффициенты корреляции индивидуальных ПАУ. Активность роли физико-химических параметров определялась: для процессов накопления – по количеству их значимых корреляционных связей с концентрациями в средах; для миграции ПАУ – по количеству значимых корреляционных связей с разницей концентраций в контактирующих средах в %.

Один из механизмов загрязнения углеводородами связывают с адсорбцией биотой ПАУ из воздуха и воды. Считается, что надземная часть растений может сорбировать из воздуха углеводородов в 10^3 – 10^6 раз больше, чем их содержится в атмосфере. Безусловно, определенная роль должна отводиться температурному режиму и влажности сред, то есть прямым интенсивным термодинамическим параметрам. Представленные расчеты в таблице 4 / table 4 имеют экстенсивную природу, а такой анализ для естественных условий проведен впервые.

Таблица 4

Оценка влияния термодинамических параметров на фазовые переходы ПАУ в средах и структурных переходах

Table 4

Evaluation of the influence of thermodynamic parameters on PAH phase transitions in media and structural transitions

Среды; барьеры // Environments; barriers	Ряд интенсивности влияния параметров // Range of intensity of influence of parameters	Число и доля (%) значимых связей параметров // Number and share (%) of significant parameter relationships				
		ΔS	ΔG	$\Delta H_{\text{газ}}$	$\Delta H_{\text{ТВ}}$	$\lg K_{\text{ow}}$
Почва // Soil	$\Delta G = \lg K_{\text{ow}} > \Delta S = \Delta H_{\text{газ}} = H_{\text{ТВ}}$	3 (9)	6(18)	3(9)	3(9)	6(18)
Корни // Roots	$\Delta G = \lg K_{\text{ow}} > \Delta H_{\text{ТВ}} > \Delta S \gg \Delta H_{\text{газ}}$	21(64)	26 (79)	4(12)	24(73)	26(79)
Стебли // Stems	$\Delta G = \lg K_{\text{ow}} > \Delta S > \Delta H_{\text{ТВ}} \gg \Delta H_{\text{газ}}$	22 (67)	23(70)	2 (6)	13 (39)	23 (70)
Снег // Snow	$\Delta S > \Delta H_{\text{ТВ}} > \lg K_{\text{ow}} > \Delta G; \Delta H_{\text{газ}} = 0$	3(100)	1(5)	0 (0)	13(68)	3 (16)
Снег–почва // Snow–soil	$\Delta S > \lg K_{\text{ow}} > \Delta G > \Delta H_{\text{газ}} > \Delta H_{\text{ТВ}}$	12(63)	8 (42)	6(32)	5(26)	9(47)
Почва–корень // Soil–root	$\Delta H_{\text{ТВ}} > \lg K_{\text{ow}} > \Delta G > \Delta S > \Delta H_{\text{газ}}$	24(72)	27(82)	15(46)	29(88)	28 (85)
Корень–стебель // Root–stem	$\Delta S > \lg K_{\text{ow}} > \Delta G > \Delta H_{\text{газ}} > \Delta H_{\text{ТВ}}$	17(52)	14(42)	11(33)	10(30)	15(46)

Для сред, за исключением снега, превалирует производство энергии Гиббса и значения $\lg K_{\text{ow}}$, что свидетельствует о максимизации неустойчивости структурных связей и самопроизвольности химических реакций. В целом это яркое свидетельство изначально высокой неравновесности системы. Отсюда высокая структурированность взаимодействия компонентов на всех уровнях иерархии. Время активизации самой системы и время структуризации потоков веществ могут реально не совпадать. Отсюда вопросы стационарности режимов взаимодействия сред весьма дискуссионны.

Каждый структурный переход уникален по своему разнообразию, что приводит к хаотическим концентрационным функциям отдельных элементов системы. Именно структурные элементы в виде взаимодействий формируют термодинамический облик сред по параметрам порядка. Затем по значимости следует энтропия и энтальпия. Для контактов ведущая роль переходит к производству энтропии и энтальпии. Это также косвенно свидетельствует о разнообразии путей и способов параметрического фракционирования и миграции растворов ПАУ, а также возрастании энергетических затрат потоков веществ на преодоление геохимических барьеров. Потеря энергии способствует

приданию системе хаотических свойств в структуризации [24].

С термодинамических позиций почва, как среда, более равновесна по сравнению с ризосферой и надземной растительностью. Депонирующая стабилизация почв для ПАУ объясняется их накоплением преимущественно в поверхностном слое почв малой мощности. Он подвержен вариациям солнечной инсоляции и вариациям температур и влаги, поэтому катаболические процессы активно варьируют во времени и пространстве. Существенны как биологические, так и физико-химические преобразования поллютантов. Распределение органики по глубине не монотонно и продиктовано искусственными поливами как на газонах кампуса, так и в придорожной части.

В целом для почвы получены невысокие оценки влияния термодинамических параметров на накопление полиаренов. Лидируют с частотами 18% (по 6 проявлений из 33) коэффициент $\lg K_{\text{ow}}$ и ΔG . Стабильность почв можно объяснить их многокомпонентностью состава, соотношениями органической и механической матриц. Динамические режимы почв не характерны и, даже крайне отличны, от других сред. Например, от снега, где проявляется ярко выраженная неоднородность частот значимых связей у

параметров. Тем не менее, почва является активной базисной средой, что подтверждается высокими параметрами частот переходов в системе передающего ПАУ импульса «почва–корень». Вопрос в том, какие полиарены из набора ПАУ будут включены в трофическую цепь и подвержены метаболизму; какие из них будут связаны почвами и в каких формах, какой пул из них будет задержан ризосферой и что уйдет в стебель? Несмотря на то, что ПАУ относят к стойким органическим веществам, практически все они подвержены растворению и, следовательно, биодоступности. Вынужденные внешние колебания источника возбуждения от АТС и автоколебательные процессы в почвенной системе усиливают процессы метаболизма. Однако их масштабы во времени и пространстве существенно отличаются от таковых в корнях и, тем более, надземной части растений. Собственно, это и формирует хаотический эффект в средах, а на их контактах в силу неравновесности, такие эффекты проявляются ярче, либо гасятся. Пример – резкое возрастание приращений энтальпии и энтропии на границах сред (таблица 4 / table 4)

В корнях количество значимых связей заметно больше; лидируют $\lg K_{ow}$ и ΔG , хотя существенно влияние ΔH_{TB} и ΔS (73 и 64% соответственно). При этом роль энтальпии образования газовой фазы веществ заметно ниже (проявляется лишь в 12% случаев).

Для стеблей характерно примерно одинаковое распределение ведущих параметров, что и для корней, однако влияние выражено слабее для параметра энтальпии. Наиболее специфической средой по соотношению вкладов термодинамических параметров является снег, в котором четко определены лидирующие позиции производства энтропии как общей меры энергии, затем функции производства тепловой энергии, $\lg K_{ow}$ и энергии Гиббса. Интересно, что для всех сред влияние производства газовой энтальпии самое незначительное, а в снегу вообще нулевое.

Расхождения в активности влияния термодинамических и физико-химических факторов для корней и стеблей можно объяснить физиологическими различиями данных частей растения, а также ролью контакта надземной части растения с воздушной средой. Практически все рассмотренные термодинамические и физико-химические характеристики в меньшей степени формируют концентрации ПАУ в стеблях, чем в корнях.

Разнообразие ассоциации мигрирующих ПАУ в стеблях растений можно объяснить прямым контактом с воздухом, загрязненным АТС. При этом не удалось выявить «преемственность» в интенсивности миграции ПАУ на точках наблюдений. Для некоторых точек непосредственно у трасс характерно полное

отсутствие перехода ПАУ, незначительные величины КТ, либо выраженный переход. Вероятно, на условия поступления и накопления ПАУ в наземной части влияет большее число внешних факторов, чем в случае миграции в системе «почва–растение». Здесь надо отметить с интенсивностью нагрузок возрастание вероятности приноса ПАУ воздушными потоками. В итоге закономерности накопления ПАУ в наземных частях растений может оказаться более «размытыми» во сравнении с почвами.

В системе «снег–почва» КТ связан отрицательно с $\Delta S_{\text{корень-стебель}}$, что подтверждает отсутствие перехода неметаморфизованных полиаренов в стебли растений. Метаболизм ПАУ (как стадия подготовки в почвах и ризосфере) необходим для миграционных растворов, питающих стебли растений. Таким образом, процессы связывания ПАУ, поступающих в почвы с атмосферными выпадениями, определяют ограниченную возможность поступления полиаренов из корней растения непосредственно в стебель.

Значимые положительные связи выявлены для коэффициентов концентрации КТ_{корень-стебель} и приращения энтропии для данной границы $\Delta S_{\text{корень-стебель}}$ ($r = 0,64$) и КТ_{почва-корень} с $\Delta S_{\text{почва-корень}}$ ($r = 0,58$). Это может объясняться тем, что в обоих случаях оценивается активность прохождения ПАУ через границу с участием корня. Его функция – фильтрация и упорядочивание потоков ПАУ. Меньшая теснота связи выявлена для структурных переходов $\Delta S_{\text{снег-почва}}$ ($r = 0,43$). Приросты энтропии и концентраций указывают на упорядоченность потоков ПАУ при движении от дисперсной формы их проникновения с твердыми и газообразными выбросами в почвы. Далее следует перераспределение ПАУ на активные, преимущественно малокольцевые, мигрирующие в ризосферу растений и по цепочке – отфильтрованный поток в стебли.

Многокольцевые ПАУ депонируются в зависимости, механического состава почв, концентраций и состава гуминовых кислот, биоценозов в верхнем слое. Механизм нарушается в придорожной части, когда микробиологические и химические процессы почв не могут обеспечить биодоступные формы ПАУ для растений (трансформацию токсичных соединений в малотоксичные) или закрепление поллютантов в малоподвижные формы. Возникает противоречие фундаментальному принципу эволюции в экологии: «биологические системы совершают работу против второго закона термодинамики за счет активных структурных изменений». Такие точечные объекты в почвах выявлены нами на точках у Ленинского просп., ул. Миклухо-Маклая и стоянках автотранспорта на территории кампуса. Графические связи между приращения энтропии и коэффициентами КТ представлены на рис. 2 / fig. 2.

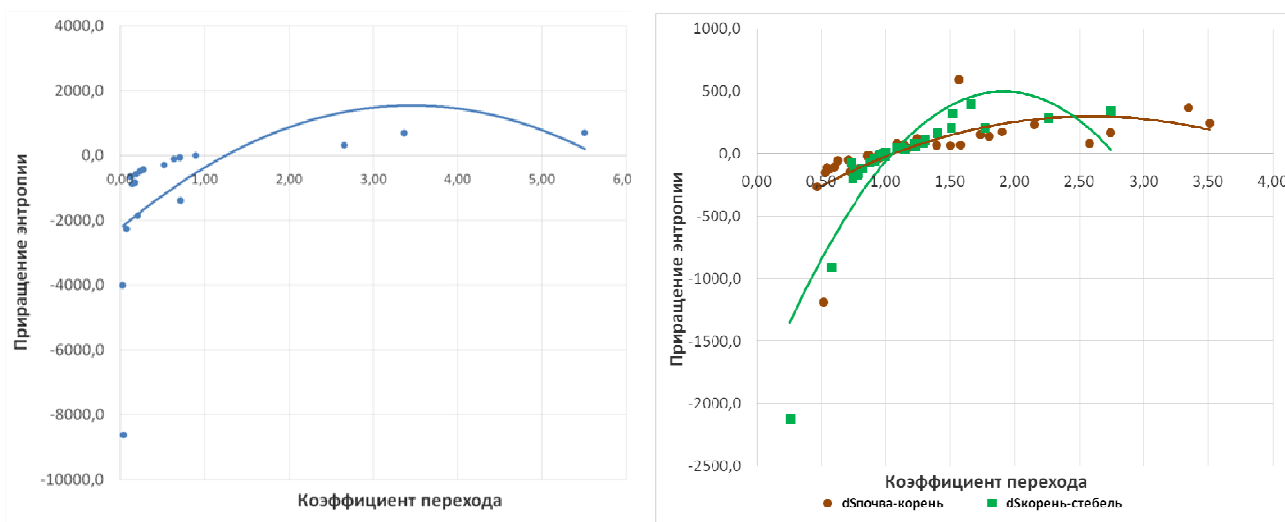


Рис. 2. Зависимости приращений энтропии от коэффициентов перехода ПАУ при структурных переходах на барьерах: «снег–почва» (слева), «почва–корень» и «корень–стебель» (справа)

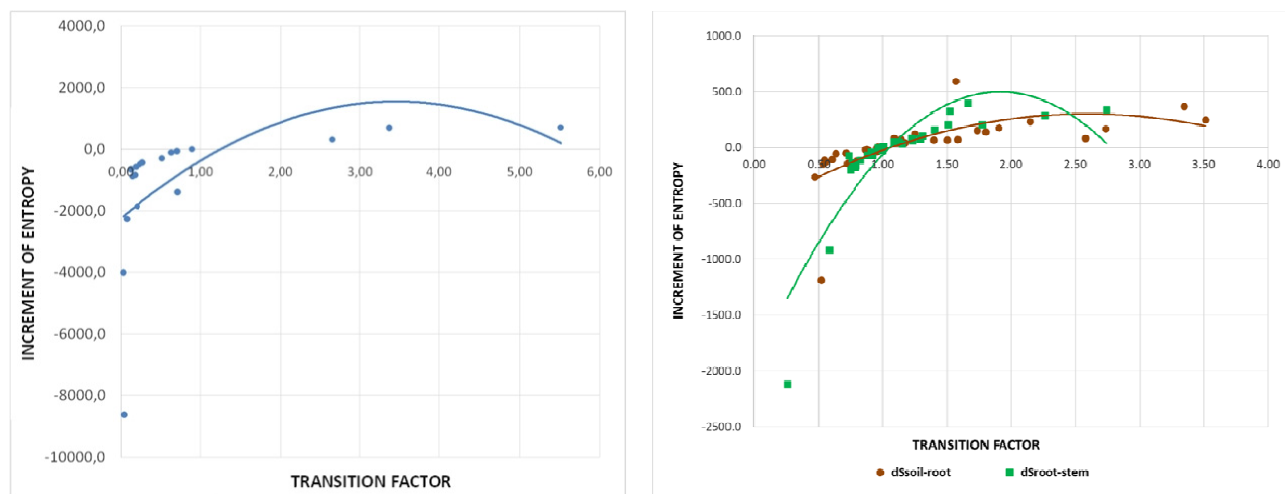


Fig. 2. Dependences of entropy increments on PAH transition coefficients during structural transitions at barriers: «snow–soil» (left), «soil–root» and «root–stem» (right)

Аппроксимация проведена с помощью квадратичных полиномов, дающих наилучшее приближение к эмпирическим данным. Несмотря на значительные вариации термодинамических параметров их зависимости от КТ примерно однотипны. Такие зависимости объективно идентифицируют связи приращения хаоса (максимум хаотического разнообразия флуктуаций импульсов) или структурное разнообразие как процессы накопления и миграции поллютантов [24]. Нелинейный характер зависимостей накладывает ограничение на теорему И. Пригожина о минимизации приращений и скорости в условиях «текущей» стационарности режима открытых систем. То же можно отнести и к условиям и максимизации ΔS на выходе систем (стеблях).

Для большинства точек коэффициент перехода «снег–почва» (кроме явно антропогенно нагруженных по периметру территории) не превышает 1, т.е. накопление ПАУ не происходит. Значения ΔS для большинства точек отрицательно, что свидетельствует о стабилизации локальных потоков ПАУ, но в большей

степени отсутствии интенсивного взаимодействия сред. Чем меньше ΔS , тем более система организована (принцип Пригожина–Гленсдорфа). Вероятность проникновения ПАУ в почвы из снега снижается вывозом снега за территорию.

График зависимости $\Delta S_{\text{почва–корень}}$ от $KT_{\text{почва–корень}}$ по сравнению с предыдущими свидетельствует о больших вариациях параметров из рассматриваемых структурных переходов, здесь фиксируется стабильный поток ПАУ с минимальными затратами энергии взаимодействия. С позиций термодинамики эта взаимосвязь наиболее эволюционна в пространстве и времени с четко сформированными механизмами структуризации. Изменения переходов варьируют не столь значительно (от 0.7 до 1.3) и выражены более закономерно для точек, приуроченных либо к окраинам кампуса, либо к автодорогам. Отсутствие перехода веществ можно идентифицировать для точек с отрицательными значениями ΔS и $KT < 0$. Выраженность пика функции в положительной области указывает, что переход вещества и энергии через границу сопровождается бифуркацией

или локальными (четко выраженными) изменениями структуры динамической системы за счет противоборства между процессами переноса. В наземной части растений может быть нарушено равновесие за счет внешних воздействий (загрязненного воздуха и выпадении поллютантов) и внутренними релаксационными процессами, стремящимися к его восстановлению. Выраженный переход ΔS из отрицательной области в положительную, а также тенденция перехода вновь к оси абсцисс свидетельствует о том, что эта структура, по сравнению с другими, находится в состоянии термодинамического неравновесия за счет естественных процессов метаболизма.

Д.С. Коржинским [11] сформулирован принцип дифференциальной подвижности компонентов в геохимических системах: *компоненты в природных системах ведут себя качественно неодинаково; для инертных компонентов независимыми являются экстенсивные, для подвижных – интенсивные параметры*. Нетрудно убедиться, что если эти заключения выразить в термодинамических понятиях, то такая дифференциация компонентов обусловлена постоянным взаимодействием внутренних и внешних факторов.

С этих позиций весь пул наших полиаренов можно было бы отнести к инертным компонентам, однако, как показано выше (табл. 4), это далеко не так. Поэтому ниже вводится обобщенное понятие *движущих*

процессов миграции ПАУ в условиях антропогенеза на основании проточности систем¹. Однако принятое в почвоведении понятие проточности упрощено и не позволяет вскрыть причину структурных и фазовых переходов вещества; необходимо его расширение.

С термодинамических позиций формации «вода – почвы – растения» можно трактовать как *суперпроточные системы*, где реализуется конечный принцип: чем больше вещества и энергии поступило в открытую систему из внешнего источника, тем более значительные количества энергии и *вещества преобразуются* при минимальном поглощении энергии и минимальной синергетичности процессов. Термодинамический поток своего рода вектор состояния системы. По мере ее эволюции происходит насыщение, с поглощением все меньших количеств энергии. Такие эффекты свидетельствуют о максимизации внутренних резервов системы, например, для самоочищения, или биодоступности. На этом эффекте, собственно, и базируется самоорганизация естественных систем. Ниже для классификации структурных переходов наряду с основными термодинамическими параметрами задействован показатель относительной токсичности ассоциаций мигрирующих ПАУ (таблица 5 / table 5).

¹ Понятие «проточность» системы в почвоведении рассматривается как наличие возможности удаления легкорастворимых компонентов за пределы почвы в результате вертикального и/или горизонтального промывания [7].

Таблица 5

Классификация структурных переходов веществ (ПАУ) по степени проточности (активности миграции)

Table 5

Classification of structural transitions of substances (PAHs) according to the degree of flow (migration activity)

Степень проточности объектов по КТ и точки наблюдений // The degree of flow of objects by CT and observation points	ΔS	ΔG	$\Delta H_{ТВ}$	$\Delta H_{ГАЗ}$	ΔTEF
Переход «снег → почва» // Transition «snow → soil»					
Слабопроточные // Low-flowing Тг.3, 7, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 19, 26, 29,31 КТ = 0,03-0,70 (0,25)	<u>-8626.0 ... -108.4</u> -1750.7	<u>-18288.1 ... -252.7</u> -3702.7	<u>-5764.9 ... -113.6</u> -1182.2	<u>-10046.8 ... -140.4</u> -2075.0	<u>-147.6 ... 4.9</u> -33.6
Нейтральные // Neutral Тг. 18, 28, 30 КТ=0,71-0,80 (0,80)	<u>-1386.9 ... 9.2</u> -480.2	<u>-2402.9 ... -49.2</u> -872.7	<u>-1760.9 ... -50.1</u> -620.9	<u>-995.4 ... -14.5</u> -370.5	<u>5.5 ... 476.6</u> 163.0
Проточные // Flowing Тг. 1, 5, 9, 10 КТ=2,66-5,50 (3,84)	<u>313.8 ... 701.3</u> 569.1	<u>513.2 ... 1480.4</u> 1129.0	<u>71.9 ... 229.7</u> 172.1	<u>315.7 ... 876.6</u> 674.4	<u>21.0 ... 102.5</u> 73.7
Переход «почва → корень» // Transition «soil → root»					
Слабопроточные // Low-flowing Тг. 8, 9, 13, 14, 20, 30, 33 КТ= 0,47-0,63 (0,55)	<u>-262.6 ... -53.8</u> -134.3	<u>-761.2 ... -138.7</u> -336.0	<u>-490.3 ... -83.2</u> -203.2	<u>-89.6 ... -24.6</u> -52.4	<u>-60.7 ... -6.6</u> -19.0
Нейтральные // Neutral Тг. 2, 3, 5, 6, 10, 15, 18, 19, 22, 23, 24, 26, 29 КТ= 0,71-1,25 (0,97)	<u>-141.8 ... 123.2</u> -0.03	<u>-281.5 ... 120.3</u> -44.5	<u>-150.7 ... 48.5</u> -34.5	<u>-76.6 ... 70.5</u> 12.8	<u>-26.7 ... -5.6</u> -14.0
Проточные // Flowing Тг. 1, 4, 7, 11, 12, 16, 17, 21, 25, 27, 31, 32	<u>67.3 ... 593.8</u> 197.5	<u>93.4 ... 1017.2</u> 319.2	<u>53.2 ... 570.3</u> 182.7	<u>20.0 ... 288.0</u> 82.7	<u>-3.8 ... 35.2</u> 5.5

Степень проточности объектов по КТ и точки наблюдений // The degree of flow of objects by CT and observation points	ΔS	ΔG	ΔH_{TB}	$\Delta H_{ГАЗ}$	ΔTEF
КТ=1,39-3,51 (2,15)					
Переход «корень» → «стебель» // Transition «root» → «stem»					
Слабопроточные // Low-flowing Тг. 1, 10 КТ= 0,26...0,58 (0,42)	-1066.7...-415.5 -741.1	-2118.8 ... -913.6 -1516.2	-1249.3 ... -545.5 -897.4	-419.2 ... -152.6 -285.9	-123.9 ... -57.4 -90.7
Нейтральные // Neutral Тг. 3, 4, 6, 7, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33 КТ= 0,73-1,29 (0,98)	-106.1 ... 148.5 -15.4	-196.1 ... 82.6 -31.7	-129.6 ... 45.4 -24.1	-39.7 ... 31.8 -3.7	-18.4 ... 3.2 -4.8
Проточные // Flowing Тг. 2, 5, 8, 9, 11, 14, 19, 22, 25 КТ= 1,31-2,74 (1.76)	48.6...450.4 167.7	104.1 ... 971.1 332.5	51.2 ... 560.3 189.5	34.0 ... 223.2 78.2	-0.8 ... 39.8 9.2

Комментируя таблицу, можно отметить следующие закономерности. Проточность как физическое явление объединяет энергию и массопотоки в динамических пространственно-временных образованиях. Открытость системы предполагает возможность возникновения высокоупорядоченных диссипативных структур и их способность к последующей организации, согласно канонам термодинамики. Необратимые реакции производства низкоэнтропийных продуктов должны обеспечивать возникновение и существование «стационарных» структурных переходов в системах, а это условная линейность протекающих процессов их итеративного воспроизводства, что нами не подтверждено эмпирически.

Классификация и рис. 2 однозначно указывают на хаотическую и нелинейную природу исходных данных в структурных переходах между компонентами экосистемы. Территориально точки не представлены выраженными закономерностями. Отрицательные потоки энергии (негэнтропия) для слабопроточных и нейтральных условий несоизмеримо больше по абсолютным значениям и числу проявлений на рассматриваемом полигоне

Каждая точка наблюдений с позиций структурных переходов представляет индивидуальное динамическое локальное образование. По А.Н. Панченкову [16], это «наполняющая пространство неразрывная сплошная хаотическая среда» и «структура хаоса». Аксиоматика подтверждена распределением концентраций ПАУ, выраженных через значения коэффициентов транслокации по площади кампуса. Процессы в системе «почва–растения» находятся под влиянием импульсных нагрузок от потоков АТС. Они создают локальные энергетические воздействия, выраженные изменчивостью химического состава ПАУ, что придает структурные разнородности в виде хаотически взаимодействующих во времени и пространстве полей.

Обратимся к осредненным схемам динамики структуризации ПАУ во взаимодействующих средах. В системе «снег–почва» выявлена доминирующая роль многоядерных ПАУ, что подтверждено их пирогенными соотношениями [35]. Такой приход изначально слабоактивных полиаренов локально депонируется почвами без проникновения в корневую систему. Этот процесс наглядно демонстрирует слабую структурную проточность и рост токсичности почв за счет атмосферных выпадений, или их буферные свойства.

Из почв а корни активно поступают лишь Naph > Fl, а из корней в стебли Phen >> Fl > An. Резкое сокращение мигрирующего ряда ПАУ обусловлено высокой подвижностью за счет их молекулярных свойств. Усвоение данных полиаренов растительностью требует гораздо меньших энергетических затрат. Именно, малоядерные представители ПАУ являются индикаторами степени проточности; они же определяют структуризацию систем в эволюционной направленности к порядку.

Проведенные впервые термодинамические оценки процессов миграции и структуризации ПАУ непосредственно на объектах позволяют дополнить аксиомы А.Н. Панченкова следующим отображением: «чистый хаос + структура» + «техногенный хаос + техногенная структура» = «наполняющая пространство хаотически техногенная среда с различной степенью эволюционности». В применении к нашим исследованиям можно констатировать принцип стремления системы к максимально возможному числу реализаций, число которых резко возрастает в условиях экстремальных техногенных нагрузок. Однако природа ограничивает такие проявления. Расчеты параметров проточности и КТ по структурным переходам ПАУ указывают на минимизацию числа реализаций в условиях техногенеза пулом из 2–3 полиаренов.

Возможно, для других видов растений и почв пул может быть существенно расширен. Так, по данным [3], значения коэффициента биологического поглощения ($K_{бп}$ ПАУ) «пахотная почва–надземная часть злаков» для пула из 7 полиаренов он изменялся от 5 (BbFlu) до 26 (Flu) при концентрациях в почвах соответственно 3 и 13 нг/г. К сожалению, автор не объясняет причину роста концентраций ПАУ в растениях в условиях фона и природу структурных приращений в большей степени за счет 3-4-ядерных ПАУ. Генерация и аккумуляция ПАУ в растениях может происходить естественным путем за счет внутриклеточного синтеза, но вряд ли может достигать в условиях фона таких значений.

Структура в данных условиях представляет диссипативный порог бифуркаций техногенной энергии и массопотоков, приводящих к эволюционным преобразованиям. Таких бифуркаций может быть несколько – это основа системообразования, а эволюция возможна с преобладающим воздействием техногенеза.

Классификация по степени проточности наглядно указывает на реализацию принципа Л. Больцмана «уменьшение потока негэнтропии достигается при увеличении разнообразия воспроизводимых объектов». К сказанному можно добавить, что первостепенную роль в этом процессе играют структурные связи.

Наименьшая проточность по эмпирическим данным присуща структурному переходу «снег–почвы». Большинство точек отнесено к слабопроточным системам с наивысшими отрицательными показателями термодинамических процессов. Вполне естественно возрастание токсичности порций талой воды, переходящей в почву, за счет увеличения присутствия многокольцевых ПАУ. Происходит также уменьшения тепла (максимальные отрицательные значения энтальпии) за счет его расхода на необратимый рост энтропии и перехода из слабопроточной неструктурированной системы в проточную с более устойчивой структуризацией. Однако такой эффект крайне локален и наблюдается в 3–4 точках быстрой инфильтрации талой воды в почвы. Реализован принцип: проточность структур определяет динамику накопления веществ, в том числе токсичных. Здесь же ярко проявляется тезис Г. Хакена о том, что долгоживущие системы подчиняют себе короткоживущие. Почвы, по сравнению со снегом, создают такие неравновесные локальности, в которых даже кратковременное текущее равновесие структурных преобразований потоков ПАУ является парадоксом.

Снеготаяние с позиций загрязнения почв можно рассматривать как локально разобщенное воздействие на почвы. Отрицательная максимизация параметрических приращений сред (ΔG , ΔS) указывает на мозаический отклик таких воздействий. Дополнительная функция энтропии – время жизни (эволюция) при таких отрицательных значениях структурных преобразований (как и энергия Гиббса, указывающая на большое отклонение от равновесия) также выступают в пользу реакции принимающей среды. В конечном итоге реализуется принцип: долгоживущие переменные управляют короткоживущими, а вышележащий уровень в системе (по иерархическому подчинению и сложности – почвы по сравнению со снегом) – нижележащим.

Ответная реакция компонентов экосистемы на транспортные нагрузки также неодинакова, о чем свидетельствуют параметры проточности. Причина, по-видимому, в исходных свойствах компонентов экосистемы, а также в «накопленных нагрузках» – длительном поступлении ПАУ в почвы и переработке механического состава почв. Например, осмотические свойства движения в растениях существенно снижают роль термодинамических сил. Массопотоки стремятся выровнять градиенты и активизируют обратные связи между компонентами систем, давая толчок к их эволюции.

Заключение

Сама по себе система взаимодействия «атмосфера–почвы–растения» в своей основе хаотична, многомерна и эволюционирует в области положительной энтропии. На импактных полигонах аппарат не-

линейной термодинамики позволяет выявить *отсутствие стационарных режимов* структурного преобразования веществ, а также бифуркации траекторий эволюции.

Нагрузки АТС на территорию имеют импульсную природу, создающую хаотически наложенное поле распределения химических элементов как техногенного, так и природного генезиса. Наложение этого поля в зависимости от розы ветров, растительности, застройки территории усиливает диффузные хаотические процессы распространения поллютантов как в атмосфере, так и в системе «почвы–растения».

Репрезентативным индикатором воздействий АТС являются ПАУ различных молекулярных масс в компонентах экосистем «снег–почвы–корни–стебли растений», рассматриваемых как структурные преобразователи выборочных пулов полиаренов. На этом принципе строятся наши исследования структурного концентрирования (биодоступности) ПАУ через оценки мер производства энтропии (ΔS), энергии Гиббса (ΔG), энтальпии (ΔH); показателя $\lg K_{ow}$ и изменений показателя токсичности (ΔTEF).

Среди причин выборочных объединений ПАУ в миграционные группировки – интенсивная зависимость их свойств от массы, структуры и размеров молекул: фракционирование обусловлено преимущественно внутренними физико-химическими свойствами. Это принципиальный вывод, позволяющий интерпретировать многие процессы миграции ПАУ в средах и на геохимических барьерах, а также превращения энергии с термодинамических позиций.

С позиций термодинамики взаимодействия «вода (снег)–почвы–растения» можно трактовать как *суперпроточную систему*, где реализован принцип: чем больше вещества и энергии поступило в систему из внешнего источника, тем больше их количества преобразуются при минимальной синергетичности процессов. Утверждение не согласуется с распространенным в биологии тезисом «чем больше преобразовано веществ, тем больше масса». Наши расчеты прироста структурных термодинамических показателей указывают на избирательный характер этого процесса.

Разнообразии временных интервалов, за которые достигается максимальное накопление или расход ПАУ, синергетичность факторов формирования градиента веществ в цепочке взаимодействующих сред определяет эволюцию компонентов и системы в целом. Концентрирование происходит в большей степени за счет микроэффектов в каждой из сред при относительном постоянстве макрофакторов (гравитация и др.).

Введение понятие термодинамическая проточность во взаимодействующие среды и расчеты параметров наглядно отражают динамическое взаимодействие компонентов экосистем и хаотическую их природу в условиях высокой транспортной нагрузки.

В отличие от распространенного выборочного метода отбора проб на содержания ПАУ, исследования по равномерной сетке дают более репрезентативные результаты о структурных переходах веществ в средах.

Сведения об авторском вкладе

А.П. Хаустов – идея, интерпретация данных, введение, результаты и обсуждение, заключение.

М.М. Редина – обработка данных, обоснование техногенных нагрузок.

Contribution of the authors

A.P. Khaustov – idea, data interpretation, introduction, results and discussion, conclusion.

M.M. Redina – data processing, substantiation of technogenic loads.

Список источников

1. *Азаров В.К., Гайсин С.В., Кутенев В.Ф.* Концепция разработки универсальной методики объективной оценки комплексной безопасности автомобиля по обеспечению безопасности водителя, пассажиров и пешеходов // Журнал автомобильных инженеров. 2017. №. 1(102). С. 44–48.
2. *Белик А.Д., Геннадиев А.Н., Кошовский Т.С.* Индикация и количественная оценка источников полиаренов в почвах методом статистического моделирования (территория нефтегазодобычи, Волгоградская область) // Почвоведение. 2021. № 5. С. 631–640. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21050038>
3. *Белых Л.И.* Распределение полициклических ароматических углеводородов в системе почва растение // Почвоведение. 2009. №. 9. С. 1083–1089.
4. *Боева Д.В., Хаустов А.П.* Оценка влияния автотранспорта на территорию кампуса Российского университета дружбы народов // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26. № 4. С. 419–430. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2018-26-4-419-430>
5. *Большман Л.* Статьи и речи. М.: Наука, 1979. 405 с.
6. *Вяткин В.Б.* Хаос и порядок дискретных систем в свете синергетической теории информации // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2009. №. 47. С. 1–34.
7. *Геннадиев А.Н., Жидкин А.П., Кошовский Т.С.* Факторы и тренды формирования природно-техногенных ассоциаций полиаренов в системе снег-почва // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 490. № 1. С. 43–47.
8. *Глазовская М.А.* Методические основы оценки эколого-геохимической устойчивости почв к техногенным воздействиям. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1997. 102 с.
9. Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2020 году» / Под ред. А.О. Кульбачевского. М., 2021. 330 с.
10. *Еськов В.М.* Системы третьего типа в медицинской кибернетике и биомеханике в целом // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 2 (32). С. 72–79. <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2020-2-9>
11. *Коржинский Д.С.* Теоретические основы анализа парагенезиса минералов. М.: Наука, 1973. 288 с.
12. *Кутенев В.Ф., Степанов В.В., Азаров В.К.* О реальном выбросе твёрдых частиц автомобильным транспортом // Журнал автомобильных инженеров. 2013. №4(81). С. 45–47
13. *Майстренко В.Н., Ключев Н.А.* Эколого-аналитический мониторинг стойких органических загрязнителей. М: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 323 с.
14. *Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е., Хайбрахманов Т.С.* Эколого-геохимическая оценка состояния запечатанных почв Восточной Москвы // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. Т. 25. № 4. С. 480–509 <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2017-25-4-480-509>
15. *Оборин А.А., Иларионов С.А., Маркарова М.Ю., Назаров А.В., Хмурчик В.Т.* Нефтезагрязненные биогеоценозы: процессы образования, научные основы восстановления, медико-экологические проблемы. Пермь: УРО РАН, 2008. 511 с.
16. *Панченков А.Н.* Трактат: Энтропийный Мир. Третий мемуар: Виртуальный мир: Постмодернизм и Аналитическое Естествознание, 2010. 25 с.
17. *Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А.* Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л.: Гидрометеониздат, 1988. 226 с.
18. *Смагин А.В.* Почвенные режимы функционирования и их мониторинг. М.: Юстицинформ, 2020. 161 с.
19. *Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Смагина М.В., Кокорева А.А.* Оценка биоремедиационной способности и экологическое нормирование городских почв по загрязнению бенз(а)пиреном // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2021. № 4. С. 67-76.
20. *Твердислов В.А., Тихонов А.Н., Яковенко Л.В.* Физические механизмы функционирования биологических мембран. М.: Изд. МГУ, 1987. 189 с.
21. *Третьяков В.А., Корнев Л.В., Кривошеева О.Б.* Воздействие шин на окружающую среду и человека. М.: Нефтехимпром, 2006. 154 с.
22. *Хакен Г.* Синергетика. Москва: Мир, 1980. 404 с.
23. *Харитонов А.С.* Симметрия хаоса и порядка в круговороте энергии. Холистическая парадигма триединства природы, человека и общества. М.: ИАЦ «Энергия», 2004. 127 с.
24. *Хаустов А.П.* Геохимические барьеры как форма самоорганизации естественных геосистем // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. Т. 25(3). С. 396–413. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2017-25-3-396-413>
25. *Хаустов А.П., Редина М.М.* Парадоксы концентрирования углеводов в компонентах геосистем (на примере ПАУ) // Сергеевские чтения: геоэкологические аспекты реализации национального проекта «Экология». Диалог поколений. Вып. 22: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гид-

рогеологии 24 марта 2020 г. М.: Изд-во РУДН, 2020. С. 94–103.

26. Химическая энциклопедия. Т.3: Меди сульфиды — Полимерные красители / гл. ред. И.Л. Кнунянц. М.: Большая Российская энциклопедия, 1992. 640 с.

27. Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М. Полициклические ароматические углеводороды в почвах и растениях нижнего яруса южной кустарниковой тундры в условиях техногенеза // Почвоведение. 2014. № 6. С. 685–696.

28. Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Василевич Р.С., Гончарова Н.Н. Участие растений в формировании состава полициклических ароматических углеводородов торфяников // Почвоведение, 2020. № 3. С. 316–329. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20030107>

29. Fismes J., Perrin Ganier C., Empeur Bissonnet P., Morel J.L. Soil to root transfer and translocation of polycyclic aromatic hydrocarbons by vegetables grown on industrial contaminated soils // Journal of environmental quality. 2002. V. 31. No. 5. P. 1649–1656.

30. Hartwell J.C. Survey of Compounds Which Have Been Tested for Carcinogenic Activity. U.S. Gov't. Printing Office. Washington, D.C., 1951. 583 p.

31. Ho K.F., Ho S., Lee S.C., Cheng Y., C. Judith, Chow, Watson J., Tian L. Emissions of gas-and particle-phase polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the Shing Mun Tunnel, Hong Kong // Atmospheric Environment, 2009. V. 43(40). P. 6343–6351. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.09.025>

32. IUSS Working Group WRB. 2015. World reference base for soil resources 2014, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.

33. Khaustov A.P., Redina M.M. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow cover of Moscow (case study of the RUDN University campus) // Polycyclic Aromatic Compounds. 2021. V. 41. No. 5. P. 1030–1041. <https://doi.org/10.1080/10406638.2019.1645707>

34. Khaustov A.P., Redina M.M., Goryainov S. Migration of PAHs and phthalates from package materials during water storage: glass or plastic? // Polycyclic Aromatic Compounds. 2020. P. 1–13. <https://doi.org/10.1080/10406638.2020.1734033>

35. Khaustov A.P., Redina M.M. Justification of geochemical markers of the soil–plant system state for a local model of traffic pressure // Arabian Journal of Geosciences. 2021. V. 14. No. 24. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08868-5>

36. Khaustov A.P., Kenzhin Zh.D., Redina M.M., Aleinikova A.M. Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Soil–Plant System as Affected by Motor Vehicles in Urban Environment // Eurasian Soil Science. 2021. V. 54. No. 7. P. 1107–1118. <https://doi.org/10.1134/S1064229321070061>

37. Knecht U., Elliehausen H.J., Judas W., Woitowitz H.J. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) in Abraded Particles of Brake and Clutch Linings // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. 1987. V. 28. No. 3. P. 227–236. <https://doi.org/10.1080/03067318708081864>

38. Nisbet C., LaGoy P. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) // Regulatory Toxicology and Pharmacology. 1992. V. 16. P. 290–300.

39. Priority Pollutant List [Электронный ресурс]. URL: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/priority-pollutant-list-epa.pdf> (дата обращения: 10.09.2022)

References

1. Azarov, V., Gaisin, S. and Kutenev, V., 2017. The concept of developing a universal methodology for an objective assessment of the integrated safety of a car to ensure the safety of a driver, passengers and pedestrians. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov*, 1(102). pp. 44–48. (in Russian)

2. Belik, A., Gennadiev, A. and Koshovsky, T., 2021. Indication and quantitative assessment of sources of polyarenes in soils by statistical modeling (oil and gas production area, Volgograd region). *Eurasian Soil Sci*, 5, pp. 631–640 <https://doi.org/10.31857/S0032180X21050038> (in Russian)

3. Belykh, L., 2009. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the soil–plant system. *Eurasian Soil Sci*. 9. pp. 1083–1089. (in Russian)

4. Boeva, D. and Khaustov, A., 2018. Assessing the impact of vehicles on the campus of the Peoples' Friendship University of Russia. *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Ser.: Ecology and safety of life*. 26(4). pp. 419–430 <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2018-26-4-419-430> (in Russian)

5. Boltzmann, L., 1979. *Stat`i i rechi* [Articles and speeches]. Moscow, Nauka. 405 p. (in Russian)

6. Vyatkin, V., 2009. Chaos i poryadok diskretny`x sistem v svete sinergeticheskoy teorii informacii [Chaos and order of discrete systems in the light of synergetic information theory]. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*, 47, pp. 1–34. (in Russian)

7. Gennadiev, A., Zhidkin, A. and Koshovsky, T., 2020. Factors and trends in the formation of natural and technogenic associations of polyarenes in the snow–soil system. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*, 490(1), P. 43–47. (in Russian)

8. Glazovskaya, M., 1997. *Metodicheskie osnovy` ocenki e`kologo-geoximicheskoy ustojchivosti pochv k texnogenny`m vozdeystviyam* [Methodological bases for assessing the ecological and geochemical resistance of soils to technogenic impacts]. Moscow, Publishing House of Moscow University. 102 p. (in Russian)

9. Kulbachevsky, A., (ed.), 2021. *Doklad «O sostoyanii okruzhayushhej sredy` v gorode Moskve v 2020 godu»* [Report «On the state of the environment in the city of Moscow in 2020»]. Moscow, 330 p. (in Russian)

10. Es`kov, V., 2020. Systems of the third type in medical cybernetics and biomechanics in general. *Measurement. Monitoring. Control*, 2 (32), pp. 72–79. <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2020-2-9> (in Russian)

11. Korzhinsky, D., 1973. *Teoreticheskie osnovy` analiza paragenezisa mineralov* [Theoretical foundations for the analysis of mineral paragenesis]. Moscow, Nauka, 288 p. (in Russian)

12. Kutenev, V., Stepanov, V. and Azarov, V., 2013. O real'nom vy'brose tvyordy'x chasticz avtomobil'ny'm transportom [On the real emission of solid particles by road transport] *Zhurnal avtomobil'ny'x inzhenerov*, 4 (81), pp. 45–47. (in Russian)
13. Maistrenko, V. and Klyuev, N., 2013. *E'kologo-analiticheskij monitoring stojkix organicheskix zagryaznitelej* [Ecological and analytical monitoring of persistent organic pollutants]. Moscow, BINOM Knowledge Lab. 323 p. (in Russian)
14. Nikiforova, E. and Kosheleva, N., 2017. Khaibrakhmanov T.S. Ecological and geochemical assessment of the state of sealed soils in Eastern Moscow. *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Ser.: Ecology and safety of life*, 25(4), pp. 480–509 <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2017-25-4-480-509> (in Russian)
15. Oborin, A., Ilarionov, S., Markarova, M., Nazarov, A. and Xmurchik, V., 2008. *Neftezagryaznenny'e biogeocenozy': processy' obrazovaniya, nauchny'e osnovy' vosstanovleniya, mediko-e'kologicheskie problemy'* [Oil-contaminated biogeocenoses: formation processes, scientific foundations of recovery, medical and environmental problems]. Perm, URO RAN, 511 p. (in Russian)
16. Panchenkov, A., 2010. *Traktat: E'ntropijny'j Mir. Tretij memuar: Virtual'ny'j mir: Postmodernizm i Analiticheskoe Estestvoznaniye* [Treatise: Entropy World. Third memoir: The Virtual World: Postmodernism and Analytical Natural Science]. 25 p. (in Russian)
17. Rovinsky, F., Teplitskaya, T. and Alekseeva, T., 1988. *Fonovy'j monitoring policiklicheskix aromatischeskix uglevodorodov* [Background monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 226 p. (in Russian)
18. Smagin, A., 2020. *Pochvenny'e rezhimy' funkcionirovaniya i ix monitoring* [Soil modes of functioning and their monitoring]. Moscow, Yustitsinform, 161 p. (in Russian)
19. Smagin, A., Sadovnikova, N., Smagina, M. and Kokoreva, A., 2021. Ocenka bioremediacionnoj sposobnosti i e'kologicheskoe normirovanie gorodskix pochv po zagryazneniyu benz(a)pirenom [Assessment of bioremediation capacity and ecological rationing of urban soils for benz(a)pyrene contamination]. *Bulletin of Moscow University. Series 17: Soil Science*, 4, pp. 67–76. (in Russian)
20. Tverdislov, V., Tikhonov, A. and Yakovenko, L., 1987. *Fizicheskie mexanizmy' funkcionirovaniya biologicheskix membran* [Physical mechanisms of functioning of biological membranes]. Moscow, Moscow State University, 189 p. (in Russian)
21. Tretyakov, V., Kornev, L. and Krivosheeva, O., 2006. *Vozdejstvie shin na okruzhayushhuyu sredu i cheloveka*. [The impact of tires on the environment and humans]. Moscow, Neftekhimprom, 154 p. (in Russian)
22. Haken, G., 1980. *Sinergetika* [Synergetics]. Moscow: Mir, 404 p. (in Russian)
23. Kharitonov, A., 2004. *Simmetriya xaosa i poryadka v krugovorote e'nergii. Xolisticheskaya paradigma triedinstva privody', cheloveka i obshhestva* [Symmetry of chaos and order in the cycle of energy. Holistic paradigm of the trinity of nature, man and society]. Moscow, IAC «Energia», 127 p. (in Russian)
24. Khaustov, A., 2017. Geochemical barriers as a form of self-organization of natural geosystems. *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and life safety*, 25(3), pp. 396–413 <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2017-25-3-396-413> (in Russian)
25. Khaustov, A. and Redina, M., 2020. Paradoxes of hydrocarbon concentration in geosystem components (on the example of PAHs). In: Sergeev's readings: geoecological aspects of the implementation of the national project «Ecology». Dialogue of generations. Issue. 22: materials of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology, 24 March, 2020, Moscow, RUDN University, pp. 94–103. (in Russian)
26. Knunyants, I., (ed.), 1992. *Ximicheskaya e'nciklopediya. T.3: Medi sul'fidy' — Polimerny'e krasiteli* [Chemical Encyclopedia. V. 3: Copper sulfides – Polymer dyes]. Moscow, Great Russian Encyclopedia, 640 p. (in Russian)
27. Yakovleva, E., Gabov, D., Beznosikov, V. and Kondratenok, B., 2014. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils and plants of the lower layer of the southern shrub tundra under technogenic conditions. *Eurasian Soil Science*, 6, pp. 685–696. (in Russian)
28. Yakovleva, E., Gabov, D., Vasilevich, R. and Goncharova, N., 2020. Participation of plants in the formation of the composition of polycyclic aromatic hydrocarbons in peatlands. *Eurasian Soil Science*, (3), pp. 316–329. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20030107> (in Russian)
29. Fismes, J., Perrin Ganier, C., Empereur Bissonnet, P. and Morel, J., 2002. Soil to root transfer and translocation of polycyclic aromatic hydrocarbons by vegetables grown on industrial contaminated soils. *Journal of environmental quality*, 31(5), pp. 1649–1656.
30. Hartwell, J., 1951. Survey of Compounds Which Have Been Tested for Carcinogenic Activity. U.S. Gov't. Printing Office. Washington, D.C. 583 p.
31. Ho K.F., Ho S., Lee S.C., Cheng Y., C. Judith, Chow, Watson J. and Tian L., 2009. Emissions of gas-and particle-phase polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the Shing Mun Tunnel, Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 43(40). pp. 6343–6351. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.09.025>
32. IUSS Working Group WRB. 2015. World reference base for soil resources 2014, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports, (106). FAO, Rome.
33. Khaustov, A. and Redina, M., 2021. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow cover of Moscow (case study of the RUDN University campus). *Polycyclic Aromatic Compounds*, 41(5), pp. 1030–1041. <https://doi.org/10.1080/10406638.2019.1645707>
34. Khaustov, A., Redina, M. and Goryainov, S., 2020. Migration of PAHs and phthalates from package materials during water storage: glass or plastic? *Polycyclic Aromatic Compounds*, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1080/10406638.2020.1734033>

35. Khaustov, A. and Redina, M., 2021. Justification of geochemical markers of the soil–plant system state for a local model of traffic pressure. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(24), <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08868-5>
36. Khaustov, A., Kenzhin, Zh., Redina, M. and Aleinikova, A., 2021. Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Soil–Plant System as Affected by Motor Vehicles in Urban Environment. *Eurasian Soil Science*, 54(7), pp. 1107–1118. <https://doi.org/10.1134/S1064229321070061>
37. Knecht, U., Elliehausen, H., Judas, W. and Weitowitz, H., 1987. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) in Abraded Particles of Brake and Clutch Linings. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 28(3), pp. 227–236. <https://doi.org/10.1080/03067318708081864>
38. Nisbet, C. and LaGoy, P. 1992. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 16, pp. 290–300.
39. Priority Pollutant List. Available from: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/priority-pollutant-list-epa.pdf> [Accessed 10th of September 2022]

Статья поступила в редакцию 16.10.2022; одобрена после рецензирования 24.10.2022; принята к публикации 03.11.2022.

The article was submitted 16.10.2022; approved after reviewing 24.10.2022; accepted for publication 03.11.2022.

РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Оригинальная научная (исследовательская) статья
УДК 504.064.4

<https://doi.org/10.17072/2410-8553-2022-2-39-52>

Порядок расчета технологических показателей выбросов загрязняющих веществ при разработке заявки на получение комплексного экологического разрешения

Михаил Андреевич Емельянов¹, Ольга Сергеевна Клочихина²

^{1,2} Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

¹ m.emelianov28@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7157-9756>

² olgasilphy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3231-2792>

Аннотация. Перспективным механизмом государственного регулирования окружающей среды может стать система технологического нормирования негативного воздействия на окружающую среду на основе наилучших доступных технологий. В основу гигиенического нормирования положен принцип установления нормативов негативного воздействия исходя из условия не превышения в контрольных точках нормативов качества окружающей среды – гигиенических нормативов – соответствующих значений предельно допустимых концентраций. Введение в систему нормирования технологических нормативов несколько изменило её суть. Так, технологические нормативы являются нормативами выбросов и сбросов загрязняющих веществ, а также нормативами допустимых физических воздействий, которые устанавливаются с применением технологических показателей. В результате введения в систему нормирования технологических нормативов представляется возможным произвести оценку вредных выбросов в атмосферу и сравнить полученные результаты с технологическими показателями. Основной целью исследования является определение порядка расчета технологических показателей выбросов загрязняющих веществ при разработке заявки на получение комплексного экологического разрешения на примере предприятия неорганической химической промышленности Пермского края. Для расчета технологических показателей выбросов загрязняющих веществ был проанализирован ряд природоохранной документации, разработанной для исследуемого предприятия, а также описана методика подбора информационно-технических справочников, применяемых для расчетов технологических показателей. В результате исследования был разработан порядок расчета технологических показателей выбросов загрязняющих веществ при разработке заявки на получение комплексного экологического разрешения, являющийся универсальным и применимым для предприятий любой отрасли промышленности.

Ключевые слова: атмосферный воздух, загрязняющие вещества, технологические показатели, комплексное экологическое разрешение, наилучшие доступные технологии, информационно-технические справочники по наилучшим доступным технологиям.

Для цитирования: Емельянов М.А., Клочихина О.С. Порядок расчета технологических показателей выбросов загрязняющих веществ при разработке заявки на получение комплексного экологического разрешения // Антропогенная трансформация природной среды. 2022. Т. 8. № 2. С. 39–52. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2022-2-39-52>

SECTION 2. POLLUTION

Original paper

Procedure for calculation of technological values of emissions with a purpose of developing for an integrated environmental permit

Mikhail A. Emelyanov¹, Olga S. Klochikhina²

^{1,2} Perm State University, Perm, Russia

¹ m.emelianov28@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7157-9756>

² olgasilphy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3231-2792>

Abstract. System of technological regulations of negative impact on the environment based on best available techniques could be perspective environment regulation.

The hygienic regulation of environment is based on the principle of non-exceedance of outdoor (ambient) air pollution level at control points. The level is represented by maximum allowable concentrations. The implementation of

technological standards into the environment regulation has changed its essence. Technological standards are standards for emissions and discharges of pollutants, as well as standards for permissible physical impacts, which are established using technological values. The assessment of air pollution and comparing the results with technological values seems possible after implementation of technological standards into the environment regulation. The main focus of the study is to determine the procedure of calculating the technological values of emissions. It was considered on the example of an inorganic chemical industry enterprise in the Perm region. A number of environmental documentation developed for the enterprise was analyzed, the methodology for selecting information and technical reference documents was described during the study to calculate the technological values of emissions. Procedure calculating the technological values of pollutant emissions was developed during the study. It is universal and applicable to enterprises in any sectors of industry.

Key words: atmospheric air, pollutants, technological values, integrated environmental permit, best available techniques, best available techniques reference document.

For citation: Emelyanov, M., Klochikhina, O., 2022. Procedure for calculation of technological values of emissions with a purpose of developing for an integrated environmental permit. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 8(2), pp. 39–52. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2022-2-39-52> (in Russian)

Введение

В Российской Федерации для установления нормативов выбросов в атмосферный воздух и сбросов в водные объекты применяется гигиеническое нормирование. В его основу положен принцип установления нормативов негативного воздействия исходя из условия не превышения в контрольных точках нормативов качества окружающей среды – гигиенических нормативов – соответствующих значений предельно допустимых концентраций. Для подтверждения этого используются методы моделирования.

В качестве исходных данных при определении массы загрязняющих веществ в выбросах и сбросах применяются расчетные методики, инструментальные замеры, балансовые методы.

В том случае, если моделирование показывает превышение гигиенических нормативов, предприятию приходится выполнять мероприятия по снижению негативного воздействия на источниках выбросов и/или сбросов, что также определяется и подтверждается расчетами [3].

С введением термина «наилучшие доступные технологии» (далее – НДТ) в Российской Федерации начался процесс перехода нормирования негативного воздействия на окружающую среду с санитарно-гигиенического подхода на технологический подход.

Указанный термин в Российской Федерации начал активно применяться после внесения изменений в Федеральный закон (ФЗ) «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 21.07.2014 № 219-ФЗ [15]. Так, в статье 1 [15], наилучшая доступная технология определяется как технология производства продукции (товаров), выполнения работ, оказания услуг, определяемая на основе современных достижений науки и техники и наилучшего сочетания критериев достижения целей охраны окружающей среды при условии наличия технической возможности её применения.

Для внедрения НДТ разработаны информационно-технические справочники по наилучшим доступным технологиям (ИТС НДТ), которые должны были стать документами по стандартизации в области технологического нормирования.

Согласно распоряжению Правительства Российской Федерации от 31 октября 2014 года № 2178-р «О поэтапном графике создания в 2015–2017 годах справочников наилучших доступных технологий» (с изменениями на 7 июля 2016 года) [13], первые в стране ИТС НДТ были разработаны в период с 2015 по 2017 гг. На первом этапе в 2015 г. было разработано 9 ИТС НДТ, на втором этапе в 2016 г. – 13 справочников, на третьем этапе в 2017 году было разработано ещё 28 ИТС НДТ. Всего, на период 2015–2017 гг. было разработано 50 ИТС НДТ.

Необходимо отметить, что существует два вида ИТС НДТ: отраслевые («вертикальные») и межотраслевые («горизонтальные») [1]. Основное отличие между двумя видами справочников состоит в том, что в отраслевых справочниках указываются маркерные вещества и технологические показатели, чего нет в межотраслевых справочниках.

ИТС НДТ применяются для расчёта технологических показателей предприятий, относящихся к объектам I и II категории негативного воздействия в конкретной отрасли промышленности. Категория присваивается объекту негативного воздействия в соответствии с критериями, установленными в Постановлении Правительства Российской Федерации от 31 декабря 2020 года № 2398 «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий» (с изменениями на 7 октября 2021 года) [7]. Государственный учет объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду в соответствии со статьей 69 Федерального закона от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» осуществляет Государственный реестр объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду [16].

Согласно Приказу Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 14.01.2019 № 89 «Об утверждении правил разработки технологических нормативов» [9], следует отметить, что технологические нормативы разрабатываются на объектах I категории, а также на объектах II категории (при наличии соответствующих ИТС НДТ), в ходе подготовки заявки на получение комплексного

экологического разрешения (КЭР) или заявки на пересмотр КЭР.

Комплексное экологическое разрешение (КЭР) [16] – документ, выдающийся природопользователю, который оказывает значительное и умеренное негативное воздействие на окружающую среду, и содержит обязательные для выполнения требования в области охраны окружающей среды.

В настоящее время заявка на получение КЭР подается природопользователями в территориальный орган Росприроднадзора. Согласно пункту 3_1 Постановления Правительства Российской Федерации от 13.02.2019 № 143 «Об утверждении Правил рассмотрения заявок на получение комплексных экологических разрешений, выдачи, переоформления, пересмотра, отзыва комплексных экологических разрешений и внесения изменений в них» обмен документами и информацией в рамках рассмотрения заявки на получение разрешения, а также заявок на переоформление, пересмотр разрешений и внесения в них изменений осуществляется с использованием государственной информационной системы промышленности (ГИСП) [8]. Исходя из сообщения, опубликованного на официальном сайте ведомства 22.07.2022, с 01.08.2022 территориальные органы Росприроднадзора прекращают прием заявок на выдачу КЭР в бумажном виде, для подачи заявки на выдачу КЭР природопользователям необходимо пройти регистрацию в ГИСП [14]. Кроме того, необходимо отметить, что утверждено Постановление Правительства Российской Федерации от 04.08.2022 № 1386 «О порядке рассмотрения заявок на получение комплексных экологических разрешений, выдачи, переоформления, пересмотра, отзыва комплексных экологических разрешений и внесения в них изменений» [6], признающее утратившим силу Постановление Правительства Российской Федерации № 143, однако, на данный момент, указанный документ не вступил в силу.

Форма заявки на получение КЭР, утверждена согласно приказу Минприроды Российской Федерации от 22 октября 2021 года № 780 «Об утверждении формы заявки на получение комплексного экологического разрешения и формы комплексного экологического разрешения» [10].

Заявка на получение КЭР должна содержать следующую информацию:

- Наименование, организационно-правовая форма и адрес (место нахождения) юридического лица или фамилия, имя, отчество (при наличии), место жительства индивидуального предпринимателя;
- Код объекта, оказывающего негативное воздействие на окружающую среду;
- Вид основной деятельности, виды и объем производимой продукции;
- Информация об использовании сырья, воды, электрической и тепловой энергии;

- Сведения об авариях и инцидентах, повлекших за собой негативное воздействие на окружающую среду и произошедших за предыдущие семь лет;
- Информация о реализации программы повышения экологической эффективности (при ее наличии);
- Расчёты технологических нормативов;
- Нормативы допустимых выбросов, нормативы допустимых сбросов высокотоксичных веществ, веществ, обладающих канцерогенными, мутагенными свойствами (веществ I, II класса опасности);
- Обоснование нормативов образования отходов и лимитов на их размещение;
- Проект программы производственного экологического контроля;
- Информация о наличии положительного заключения государственной экологической экспертизы;
- Иная информация, которую заявитель считает необходимым представить.

Таким образом, в данной статье рассмотрена часть одного из пунктов заявки на получение КЭР – расчёты технологических нормативов. В частности, проведены расчеты технологических показателей выбросов для предприятия неорганической химической промышленности, расположенного в г. Пермь. На примере проделанной работы был составлен алгоритм расчета технологических показателей выбросов и перечень необходимых для расчета данных. Следует отметить, что кроме расчетов технологических показателей выбросов форма заявки [10] также содержит разделы для расчетов технологических показателей сбросов и технологических нормативов физических воздействий.

Материал и методика

Исследование по разработке методики порядка расчета технологических показателей выбросов загрязняющих веществ были проведены в ходе летней технологической практики в проектной организации (далее – компания) в рамках подготовки материала для написания выпускной квалификационной работы.

Компания предлагает широкий перечень услуг для предприятий в области охраны окружающей среды. Компания получила положительный результат согласования документации в более, чем 30 субъектах РФ.

Проектная организация разрабатывает природоохранную документацию для объектов I, II, III, IV категории, в соответствии с постановлением правительства Российской Федерации от 31 декабря 2020 года № 2398 «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий» [7].

Для исследования была предоставлена природоохранная документация для предприятия, основным видом экономической деятельности которого, согласно коду ОКВЭД 2, является – «20.13 – производство

прочих основных неорганических химических веществ», разработанная Проектной организацией.

На первом этапе исследования необходимо определить виды деятельности, осуществляемые предприятием. Вид деятельности предприятия заключен в коде ОКВЭД 2, и определяется в соответствии с общероссийским классификатором видов экономической деятельности ОК 029-2014 (КДЕС, Ред. 2) [4]. В качестве классификационных признаков видов экономической деятельности в ОКВЭД 2 используются признаки, характеризующие сферу деятельности, процесс производства (технологию) [4]. Указанные сведения о виде экономической деятельности конкретного предприятия, как правило, содержатся в «Выписке из Единого государственного реестра юридических лиц» (далее – выписка), однако, как показывает практика, данные содержащиеся в выписке не всегда являются актуальными. В таких случаях, разработчик документации, в данном случае – инженер-эколог, должен запросить и проанализировать уже имеющуюся, ранее разработанную природоохранную документацию, у заказчика, в которой содержатся данные о виде экономической деятельности предприятия, являющегося объектом негативного воздействия (далее – ОНВ). Примером такого документа является проект инвентаризации стационарных источников и выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Согласно Приказу Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (далее – Минприроды России) от 19.11.2021 № 871 «Об утверждении Порядка проведения инвентаризации стационарных источников и выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, корректировки ее данных, документирования и хранения данных, полученных в результате проведения таких инвентаризации и корректировки» [11], указанный проект должен содержать сведения о видах деятельности предприятия.

Вторым этапом, после определения видов экономической деятельности, осуществляемых предприятием, является определение перечня продукции, выпускаемой предприятием. Сведения о классификации продукции, выпускаемой предприятием, содержатся в общероссийском классификаторе продукции по видам экономической деятельности ОК 034-2014 (КПЕС 2008) и заключаются в коде ОКПД 2 [5]. Данные о выпускаемой на предприятии продукции необходимы для правильного подбора ИТС НДТ, применяемых для дальнейшего расчёта технологических показателей выбросов исследуемого предприятия, исходя из вида экономической деятельности, согласно коду ОКВЭД 2, в соответствии с производимой продукцией, согласно коду ОКПД 2.

Необходимо отметить, что указанные ранее классификаторы входят в состав национальной системы стандартизации Российской Федерации.

На практике, определение перечня продукции, выпускаемой предприятием, проводится с помощью анализа разработанной ранее природоохранной документации. В частности, согласно Приказу Минприроды России от 11.08.2020 № 581 «Об утверждении методики разработки (расчета) и установления нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух» [12], разработанный для конкретного исследуемого предприятия проект нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух должен содержать сведения об объекте ОНВ и его воздействии на атмосферный воздух с учетом возможных изменений видов и объемов деятельности (перспективы развития), которые включаются в описание видов деятельности на объекте ОНВ, включая сведения о видах и характеристиках используемого сырья, материалов, топливно-энергетических ресурсов; информацию о видах и объемах производства продукции (товаров), выполнения работ и (или) оказания услуг (далее - производство продукции) с указанием проектных и фактических значений, включающую показатели основной деятельности, описание основных технологических процессов, оборудования и источников выбросов [12].

Третий этап исследования заключается в подборе ИТС НДТ, исходя из данных о виде экономической деятельности и выпускаемой предприятием продукции. Процесс подбора ИТС НДТ заключается в анализе самих справочников. Зачастую, название ИТС НДТ имеет схожее наименование с видом экономической деятельности, поэтому, в случае, когда предприятие является комбинатом, то есть, осуществляют несколько видов деятельности и производит несколько видов продукции, подбор ИТС НДТ, используемых для дальнейших расчетов технологических показателей выбросов, происходит исходя из вида экономической деятельности предприятия, включая дополнительные (таблица 1 / table 1). Однако, для более точного подбора ИТС НДТ, необходимо провести анализ каждого из потенциально применимых, согласно наименованию справочников, путем подбора ИТС НДТ, исходя из сферы их применения. Как правило, данные о сфере применения конкретного ИТС НДТ содержатся в приложении справочника.

Для наглядного обобщения полученных данных была составлена таблица по определению ИТС НДТ, исходя из кода ОКВЭД 2 и ОКПД 2 для исследуемого предприятия.

Таблица 1

Определение ИТС НДТ исходя из кода ОКВЭД 2 и ОКЦД 2 для исследуемого предприятия

Код ОКВЭД 2	Вид экономической деятельности, осуществляемый предприятием по коду ОКВЭД 2	Код ОКЦД 2	Вид продукции, выпускаемой предприятием		Наименование применяемого ИТС НДТ
			Наименование продукции по коду ОКЦД 2	Наименование производимой продукции	
20.13 (осн.)	Производство прочих основных неорганических химических веществ	20.13.24.141 20.13.21.130 20.13.22.000	Фторид водорода (кислота плавиковая) Фтор Соединения неметаллов с галогенами или серой	Безводный фтористый водород Фторпроизвольные Элегаз (шестифтористая сера)	Производство твердых и других неорганических химических веществ (ИТС 19 – 2020) Производство твердых и других неорганических химических веществ (ИТС 19 – 2020) Производство твердых и других неорганических химических веществ (ИТС 19 – 2020) Производство твердых и других неорганических химических веществ (ИТС 19 – 2020)
20.14 (доп.)	Производство прочих основных органических химических веществ	20.13.62.190 20.14.19.130	Соли неорганических кислот или пероксикислот прочих Производные галогенированные алициклических углеводородов, содержащие два или более различных галогена	Хлористый кальций жидкий Хладон 22	Производство твердых и других неорганических химических веществ (ИТС 19 – 2020) Производство продукции тонкого органического синтеза (ИТС 31 – 2021)
20.14 (доп.)	Производство прочих основных органических химических веществ	20.14.19.130 20.14.19.130	Производные галогенированные алициклических углеводородов, содержащие два или более различных галогена Производные галогенированные алициклических углеводородов, содержащие два или более различных галогена	Хладон 125 и С318 Отходы производства хладонов	Производство продукции тонкого органического синтеза (ИТС 31 – 2021) Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами (ИТС 9 – 2020)
20.16 (доп.)	Производство пластмасс и синтетических смол в первичных формах	20.14.19.130 20.16.54.000	Производные галогенированные алициклических углеводородов, содержащие два или более различных галогена Полиамиды в первичных формах	Мономер-4 Фторопласты	Производство продукции тонкого органического синтеза (ИТС 31 – 2021) Производство полимеров, в том числе биоразлагаемых (ИТС 32 – 2017)

*Примечание:

ИТС НДТ – информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям

Table 1

Determination of BREFs based on OKVED 2 and OKPD 2 code for the studied enterprise

Economic activity of the enterprise		Product by Economic Activities of the enterprise				BREF's name
Code of OKVED 2	Economic activity type code (OKVED 2)	Code of OKPD 2	Product code (OKPD 2)	Name of manufactured products		
20.13	Manufacture of other basic inorganic chemicals	20.13.24.141	Hydrogen fluoride	Anhydrous hydrogen fluoride	ITS 19 – 2020 Manufacture of solid and other inorganic chemicals	
		20.13.21.130	Fluorine	Fluoro derivatives	ITS 19 – 2020 Manufacture of solid and other inorganic chemicals	
		20.13.22.000	Compounds of non-metals with halogens or sulfur	Sulfur hexafluoride	ITS 19 – 2020 Manufacture of solid and other inorganic chemicals	
		20.13.62.190	Salts of inorganic acids or others peroxyacids	Liquid calcium chloride	ITS 19 – 2020 Manufacture of solid and other inorganic chemicals	
20.14	Manufacture of other basic organic chemicals	20.14.19.130	Halogenated acyclic hydrocarbon derivatives containing two or more different halogens	Halon 22	ITS 31 – 2021 Manufacture of organic fine chemicals	
		20.14.19.130	Halogenated acyclic hydrocarbon derivatives containing two or more different halogens	Halon 125 & C318	ITS 31 – 2021 Manufacture of organic fine chemicals	
20.14	Manufacture of other basic organic chemicals	20.14.19.130	Halogenated acyclic hydrocarbon derivatives containing two or more different halogens	Halon production waste	ITS 9 – 2020 Thermal treatment of waste	
		20.14.19.130	Halogenated acyclic hydrocarbon derivatives containing two or more different halogens	Monomer-4	ITS 31 – 2021 Manufacture of organic fine chemicals	
20.16	Manufacture of plastics and synthetic resins in primary forms	20.16.54.000	Polyamides in primary forms	Fluoroplasts	ITS 32 - 2017 Production of polymers, including biodegradable	

*Note:

BREFs – Best Available Techniques reference document

Таким образом, данные, собранные в ходе первых трёх этапов исследования, позволяют определить перечень ИТС НДТ для конкретного предприятия.

Четвёртый этап исследования заключается в сравнении технологий производства каждого вида продукции, выпускаемого предприятием, содержащихся в природоохранной документации с технологиями, содержащимися в ИТС НДТ. Следует отметить, что описание технологических процессов, содержащихся в разработанной природоохранной документации, часто бывает недостаточно подробным. В таком случае, для более правильного сравнения необходим анализ технологических регламентов, конкретного технологического процесса, утвержденного предприятием.

В случае если технологический процесс, применяемый при производстве конкретного вида продукции отличен от технологического процесса, описанного в ИТС НДТ, то применение данного справочника не является верным, следовательно, расчёт технологических показателей для данного вида продукции не может быть произведён.

На пятом этапе необходимо провести анализ данных по объёмам выпускаемой предприятием продукции. Согласно Приказу Министерства природных ре-

сурсов и экологии Российской Федерации от 14.02.2019 № 89 «Об утверждении Правил разработки технологических нормативов» [9], для расчёта технологических показателей выбросов необходимо определить величины годового выпуска продукции. Данный показатель определяется как показатель максимального объёма произведенной продукции на объекте технологического нормирования в течение года за несколько лет, но не более пяти лет, предшествующих году, в котором производятся расчёты технологических нормативов.

Данные по валовому объёму производимой продукции, предоставленные исследуемым предприятием и представленные в таблице 2, являются конфиденциальными, поэтому в данной работе, числовые показатели величин валового объёма производимой продукции носят не точный, но близкий к фактическим значениям характер. Исходя из данных, предоставленных исследуемым предприятием и Проектной организацией, согласно Приказу МПР РФ № 89 [9] максимальный объём производимой продукции, исследуемого предприятия был установлен в 2020 году и составил 108 010 т/год (таблица 2 / table 2).

Таблица 2

Валовый объём производимой продукции исследуемого предприятия, т/год /

Table 2

Volume of manufactured production for the studied enterprise

№ // No.	Наименование продукции // Name of manufactured products	Валовый объём производимой продукции, т/год // Volume of production, tones/year
		2020 год // 2020 year
1	Безводный фтористый водород // Anhydrous hydrogen fluoride	18000
2	Фторпроизводные // Fluoro derivatives	11000
3	Элегаз (шестифтористая сера) // Sulfur hexafluoride	800
4	Хлористый кальций // Liquid calcium chloride	3000
5	Хладон 22 // Halon 22	10000
6	Хладон 125, C318 // Halon 125 & C318	200
7	Отходы // Wastes	60000
8	Мономер-4 // Monomer-4	10
9	Фторопласты // Fluoroplasts	5000
ВСЕГО // TOTAL:		108010

Далее, на шестом этапе исследования необходимо определить маркерные вещества и технологические показатели выбросов, содержащиеся в ИТС НДТ. Технологические показатели выбросов, содержащиеся в справочниках, как правило, представлены в разделе, именуемом – «Технологические показатели».

Дальнейшее исследование по расчетам технологических показателей выбросов представлены на примере производства элегаза (шестифтористой серы, гексафторида серы) (таблица 2).

Технологические показатели выбросов загрязняющих веществ для производства элегаза представлены в ИТС 19 – 2020 «Производство твердых и других неорганических химических веществ» [2] и представлены в таблице 3.

Исходя из данных, представленных в таблице 3, маркерными веществами для расчетов технологических показателей выбросов производства элегаза являются гексафторид серы и фториды газообразные.

Седьмой этап исследования заключается в определении объектов и анализе источников выбросов загрязняющих веществ, для которых на основе разработанной природоохранной документации будут рассчитаны технологические показатели. На данном этапе необходимо проанализировать источники выбросов загрязняющих веществ и выявить те загрязняющие вещества, которые являются маркерными при производстве данного вида продукции. Процедура выявления указанных источников выбросов загрязняющих веществ представлена в таблице 4.

Таблица 3

Технологические показатели выбросов загрязняющих веществ

Table 3

Technological values of pollutant emissions

Наименование производимой продукции // Name of manufactured products	Загрязняющее вещество // Pollutant	Единицы измерения // Units	Значение // Value
Гексафторид серы // Sulfur hexafluoride	Гексафторид серы // Sulfur hexafluoride	кг/т // kg/tones	≤ 16,52
	Фториды газообразные (гидрофторид, кремний тетрафторид) (в пересчете на фтор) // Gaseous fluorides	кг/т // kg/tones	≤ 0,011

Таблица 4

Сведения о стационарных источниках и выбросах

Table 4

Data about stationary sources and emissions

Цех, участок (подразделение) // Sector		Источник выделения загрязняющих веществ // Source of pollutant generation	Наименование стационарного источника выбросов загрязняющих веществ (источника) // Name of pollutant emission source	Загрязняющее вещество // Pollutant		Выбросы загрязняющих веществ // Pollutant emissions
Номер // №	Наименование // Name	Наименование // Name		Код // Code	Наименование // Name	т/год // tones/year
1	Цех: Производствo элегаза // Sector: Manufacturion of sulfur hexafluoride	Установка плавления серы // Sulfur melting furnace	Труба № 1 // Pipe No. 1	0342	Фтористые газообразные соединения // Gaseous fluorides	0,0001
				0965	Тетрафторметан (Фреон 14) // Freon 14	0,200
		Реактор синтеза элегаза / Sulfur hexafluoride fusion reactor	Труба № 2 // Pipe No. 2	0342	Фтористые газообразные соединения // Gaseous fluorides	0,0012
				0369	Гексафторид серы // Sulfur hexafluoride	1,200

Согласно сведениям, представленным в таблице 4, на исследуемом предприятии при производстве элегаза в атмосферный воздух выбрасываются фтористые газообразные соединения, тетрафторметан и гексафторид серы. Исходя из доводов, представленных ранее, для расчета технологических показателей выбросов следует принимать те вещества, которые являются маркерными при производстве элегаза: фтористые газообразные соединения и гексафторид серы.

Заключительным – восьмым этапом исследования по разработке порядка расчета технологических показателей выбросов для подачи заявки на КЭР является расчет технологических показателей.

Согласно Приказу Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 14.02.2019 № 89 «Об утверждении Правил разработки технологических нормативов» [9] расчёты удельных значений массы выбросов, сбросов каждого маркерного вещества в расчете на единицу производимой продукции осуществляются путем деления годовых валовых выбросов, годовой массы сбросов каждого маркерного вещества на величину годового выпуска

продукции на объекте технологического нормирования. В случае, если технологические показатели НДТ установлены в виде удельного значения массы выбросов, массы сбросов маркерных веществ на единицу производимой продукции, то значения технологических показателей для выбросов, сбросов маркерного вещества для действующего объекта технологического нормирования принимается равным удельным значениям массы выбросов, массы сбросов этого вещества [9].

Таким образом, на основе данных, представленных в таблице 4 и таблице 2 необходимо рассчитать технологический показатель выбросов загрязняющих веществ для каждого вида продукции. На примере производства элегаза в таблице 5 представлены расчеты технологических показателей выбросов для исследуемого предприятия согласно форме таблицы представленной в приказе Минприроды Российской Федерации от 22 октября 2021 года № 780 «Об утверждении формы заявки на получение комплексного экологического разрешения формы комплексного экологического разрешения» [10].

Таблица 5

Технологические показатели выбросов элегаза на примере исследуемого предприятия
 Technological values of sulfur hexafluoride emission by the example of the studied enterprise

№ // No.	Характеристика стационарного источника // Characteristics of stationary source			Загрязняющее вещество // Pollutant		Технологический показатель НДТ // Technological values of BAT		Технологический показатель стационарного источника // Technological values of stationary source	
	Наименование, номер источника / Name of sources	Кол-во ист-ов / Number of sources	Мощность // Power Ед. изм. // Value // Value	Наименование // Name	Класс опасности // Hazard class	Ед. изм. // Unit	Величина // Value	Ед. изм. // Unit	Величина // Value
1	Труба № 1 / Pipe No. 1	1	т/год // tones/year 0,0001	Фтористые газообразные соединения // Fluoride gaseous compounds	2	кг/т // kg/tones	< 0,011	кг/т // kg/tones	0,000125
2	Труба № 2 / Pipe No. 2	1	т/год // tones/year 0,0012	Фтористые газообразные соединения // Fluoride gaseous compounds	2	кг/т // kg/tones	≤ 0,011	кг/т // kg/tones	0,0015
3	Цех: Производство элегаза / Sector: Manufacture of sulfur hexafluoride	2	1,200	Гексафторид серы // Hexafluoride sulfur	-	кг/т // kg/tones	≤ 16,52	кг/т // kg/tones	1,5
			0,0013	Фтористые газообразные соединения // Fluoride gaseous compounds	2	кг/т // kg/tones	≤ 0,011	кг/т // kg/tones	0,001625
			1,200	Гексафторид серы // Hexafluoride sulfur	-	кг/т // kg/tones	≤ 16,52	кг/т // kg/tones	1,5

Примечание: НДТ – наилучшие доступные технологии
 Note: BAT – best available techniques

Представленные в таблице 5 расчеты технологических показателей выбросов показали, что технологические показатели, рассчитанные для цеха производства элегаза не превышают технологические показатели, содержащиеся в ИТС 19 – 2020 «Производство твердых и других неорганических химических веществ» [2]. Данный вывод подтвержден расчетами технологических показателей выбросов для каждого стационарного источника выбросов загрязняющих веществ (труба № 1; труба № 2), исследуемого предприятия.

Таким образом, идентичную процедуру, представленную в данной работе, необходимо провести для каждого цеха, являющегося объектом по производству конкретного вида продукции.

Результаты исследования

В ходе проведенного исследования по разработке методики порядка расчета технологических показателей выбросов загрязняющих веществ при разработке заявки на получение комплексного экологического разрешения на примере предприятия неорганической химической промышленности, расположенного на территории Пермского края, основным видом экономической деятельности которого исходя из кода ОКВЭД 2 является «20.13 – производство прочих основных неорганических химических веществ» был сформирован алгоритм действий, необходимый для правильного расчета технологических показателей выбросов загрязняющих веществ, представленный на рис. 1 / fig. 1.

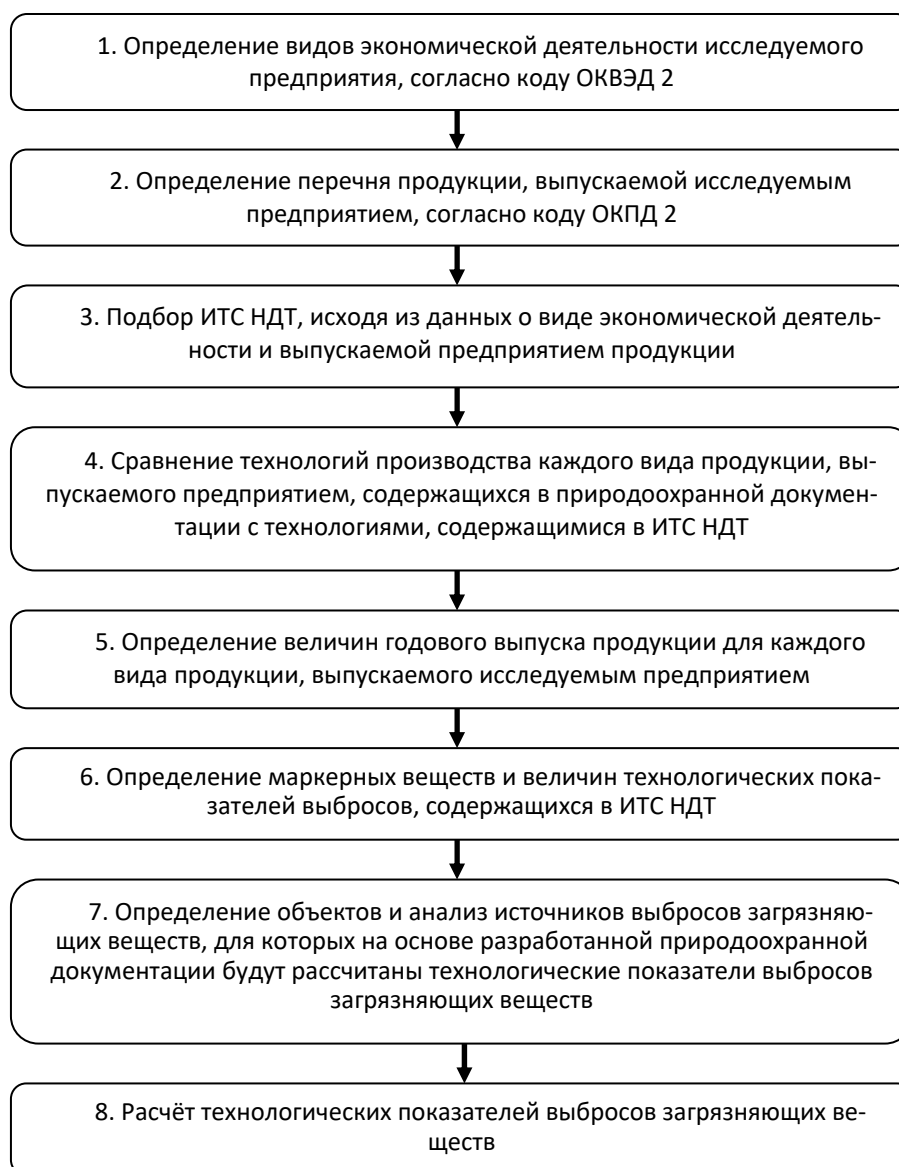


Рис. 1. Порядок расчета технологических показателей выбросов загрязняющих веществ при разработке заявки на получение комплексного экологического разрешения

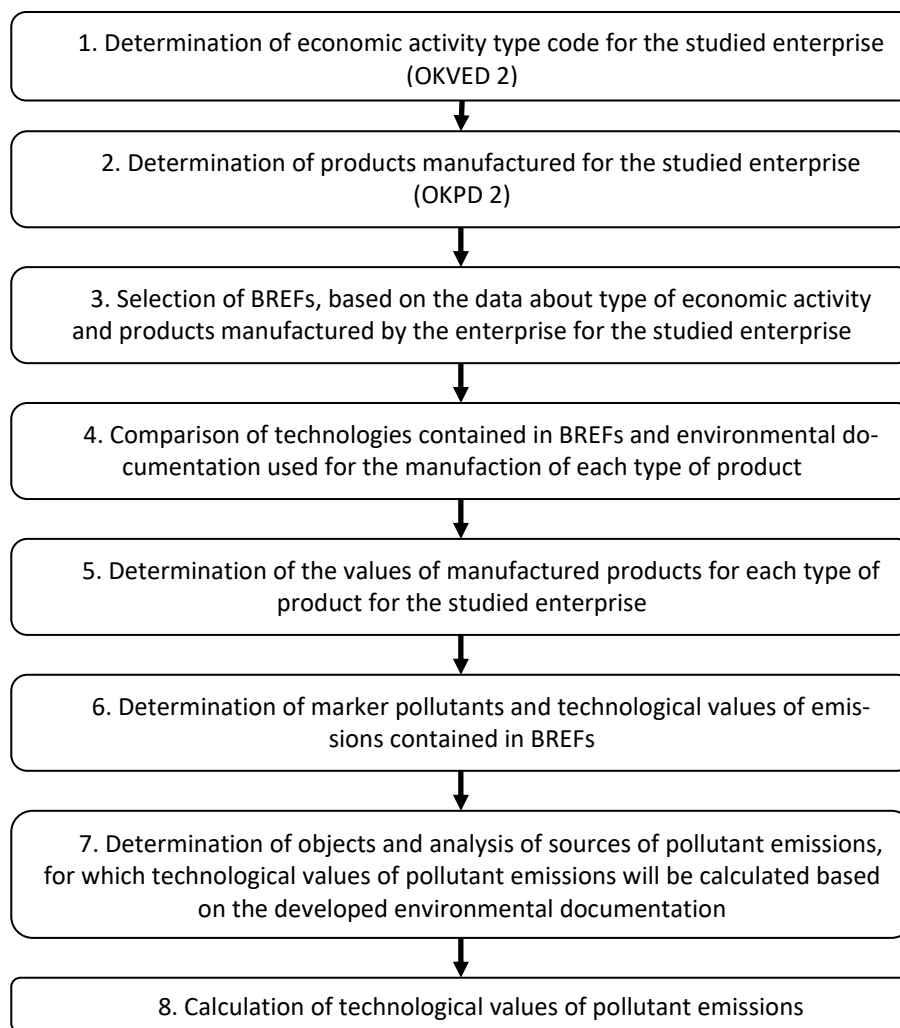


Fig.1. Procedure for calculation of technological values of pollutant emissions with a purpose of developing for an integrated environmental permit

Обсуждение

Представленный в исследовании подход к нормированию выбросов загрязняющих веществ с использованием наилучших доступных технологий применяется за рубежом. НДТ стали важным инструментом европейского регулирования промышленных выбросов и были внедрены в 1996 году директивой «О комплексном предотвращении загрязнения и контроле над ним». Согласно директиве НДТ определяется в директиве как «наиболее эффективная и продвинутая стадия в развитии деятельности и методов ее эксплуатации, которая указывает на практическую пригодность конкретных методов для обеспечения основы для предельных значений выбросов и других условий разрешений, разработанных предотвратить, а там, где это практически невозможно, сократить выбросы и воздействие на окружающую среду в целом».

В Евросоюзе НДТ применяются на двух уровнях. Во-первых, на европейском уровне были созданы «Best Available Techniques reference documents» (BREF). Во-вторых, BREF применяются на местном уровне для улучшения производственных процессов с целью минимизации негативного воздействия на окружающую среду [17]. BREFs являются аналогами

ИТС НДТ, применяемых при расчетах технологических показателей выбросов и заполнении заявки на КЭР.

В основе системы выдачи разрешений на основе НДТ должен находиться комплексный подход к предотвращению и контролю загрязнений (ИППС), то есть, комплексный учет эмиссий в атмосферу, воду и почву. Такой подход гарантирует, что эмиссии загрязняющих веществ и иные экологические нагрузки будут снижены, а не просто перенесены в другие компоненты окружающей среды [20].

В Соединенных Штатах Америки (США) нет стандартизированных НДТ или справочных документов по технологиям (technology reference documents). В стране действует ряд программ по использованию на промышленных объектах стандартов результативности для применяемых технологий на национальном уровне, уровне штатов и местном уровне, как правило, в количественной форме предельных значений эмиссий (ELVs). Предельные значения эмиссий могут разрабатываться для того, чтобы дать возможность побуждать к применению природопользователей технологий предотвращения загрязнения. Например, использованию незагрязняющих процессов или сырье-

вых материалов, более чистого топлива или более энергоэффективных процессов. Таким образом, природопользователи обязаны путем применения программ по контролю загрязнений обеспечивать достижение и поддержание стандартов качества, в том числе – воздуха [18].

Экологический кодекс Республики Казахстан от 9 января 2007 года устанавливает пилотные условия для НДТ и комплексных экологических разрешений в соответствии с критериями, установленными Директивой ЕС по промышленным эмиссиям. В то время как Экологический кодекс 2007 года предоставил возможность принятия НДТ и комплексных экологических разрешений (КЭР), на практике ни НДТ, ни КЭР не внедрялись. К началу 2018 года не было подано ни одной заявки на получение КЭР. В настоящее время основным инструментом контроля загрязнения для стационарных источников в Казахстане является система стандартов качества окружающей среды, выраженная через предельно допустимые концентрации [19].

Выводы

1. Предложенный в данной работе порядок расчетов технологических показателей выбросов загрязняющих веществ даёт возможность определить перечень данных, необходимых для проведения расчетов технологических показателей.

2. На примере конкретного вида продукции (электроника) был проведен расчет технологических показателей выбросов. Расчет показал, что технологические показатели, рассчитанные в ходе исследования, не превышают технологические показатели, содержащиеся в ИТС НДТ.

3. Предложенный порядок расчетов технологических показателей выбросов загрязняющих веществ является универсальным, и применим для расчетов технологических показателей выбросов для предприятий – объектов негативного воздействия на окружающую среду, осуществляемых любой вид экономической деятельности.

Сведения об авторском вкладе:

М.А. Емельянов – обработка исходных данных; подбор и сравнение технологий, содержащихся в ИТС НДТ с технологиями, содержащимися в природоохранной документации, исследуемого предприятия; определение маркерных веществ и величин технологических показателей выбросов; расчёт технологических показателей выбросов загрязняющих веществ; формирование порядка расчета технологических показателей выбросов загрязняющих веществ; написание выводов и результатов исследования.

О.С. Ключихина – сбор исходных данных; разработка структуры статьи; написание аннотации публикации на английском языке; корректировка финального варианта публикации.

Contribution of the authors:

M.A. Emelyanov – processing of initial data; selection and comparison of technologies contained in ITS BAT

with the technologies contained in environmental documentation of the studied enterprise; determination of marker pollutants and values of process parameters of emissions; calculation of technological values of pollutant emissions; formation of the procedure for calculation of technological values of pollutant emissions; writing conclusions and results of research.

O.S. Klochikhina – initial data collection; formulation of the structure of the paper; writing the annotation of the publication in English; correcting the final version of the paper.

Список источников

- ГОСТ Р 56828.15-2016 Наилучшие доступные технологии. Термины и определения [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200140738> (дата обращения: 15.10.22).
- ИТС 19 – 2020 «Производство твёрдых и других неорганических химических веществ» [Электронный ресурс]. URL: http://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1506&etkstructure_id=1872 (дата обращения: 18.10.2022).
- Костылева Н. В., Шенфельд Б. Е., Бузмаков С. А. К вопросу практической реализации внедрения нормирования выбросов загрязняющих веществ в атмосферу на основе наилучших доступных технологий // Экология и промышленность России. 2015. Т.19. № 12. С. 30–35 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25006681> (дата обращения: 15.10.22)
- Общероссийский классификатор видов экономической деятельности (ОКВЭД 2). ОК 029-2014 (КДЕС Ред.2) [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200110162> (дата обращения: 17.10.2022).
- Общероссийский классификатор продукции по видам экономической деятельности (ОКПД 2). ОК 034-2014 (КПЕС 2008) [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200110164> (дата обращения: 17.10.2022).
- Постановление Правительства Российской Федерации от 04.08.2022 № 1386 «О порядке рассмотрения заявок на получение комплексных экологических разрешений, выдачи, переоформления, пересмотра, отзыва комплексных экологических разрешений и внесения в них изменений» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/351439814> (дата обращения: 17.10.22).
- Постановление Правительства Российской Федерации от 31.12.2020 № 2398 «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573292854> (дата обращения: 16.10.2022).
- Постановление Правительства Российской Федерации от 13.02.2019 № 143 «Об утверждении Правил рассмотрения заявок на получение комплексных экологических разрешений, выдачи, переоформления, пересмотра, отзыва комплексных экологических разрешений и внесения изменений в них» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/552405898> (дата обращения: 16.10.22).

9. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 14.02.2019 № 89 «Об утверждении Правил разработки технологических нормативов» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/542643374> (дата обращения: 17.10.2022).

10. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 22.10.2021 № 780 «Об утверждении формы заявки комплексного экологического разрешения и формы комплексного экологического разрешения» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/727092694> (дата обращения: 17.10.2022).

11. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 19.11.2021 № 871 «Об утверждении Порядка проведения инвентаризации стационарных источников и выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, корректировки ее данных, документирования и хранения данных, полученных в результате проведения таких инвентаризации и корректировки» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/727251276> (дата обращения: 17.10.2022).

12. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 11.08.2020 № 581 «Об утверждении методики разработки (расчета) и установления нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565780531> (дата обращения: 17.10.2022).

13. Распоряжение Правительства Российской Федерации «О поэтапном графике создания в 2015–2017 годах справочников наилучших доступных технологий» от 31.10.2014 № 2178-р [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420230975> (дата обращения: 16.10.22).

14. Федеральная служба по надзору в сфере природопользования [Электронный ресурс]. URL: https://rpn.gov.ru/news/rosprirrodnadzor_informiruet_o_nachale_ekspluatatsii_gisp_v_chasti_rassmotreniya_zayavok_na_polucheni/ (дата обращения: 17.10.22).

15. Федеральный закон «О внесении изменений в Федеральный закон "Об охране окружающей среды" и отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 21.07.2014 № 219-ФЗ [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420208818> (дата обращения: 15.10.22).

16. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 № 7-ФЗ [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901808297> (дата обращения: 17.10.22).

17. Evrard Damien, Valerie Laforest, Jonathan Valliot and Rodolphe Gaucher. «Best Available Techniques as a Sustainability Tool in Manufacturing: Case Study in the Dairy Sector» *Procedia CIRP*, 2016, 520–525 [Электронный ресурс]. URL: <https://hal.emse.cnrs.fr/emse-01350886/file/2016-222.pdf> (дата обращения: 17.10.22).

18. OECD // Best Available Techniques (BAT) for Preventing and Controlling Industrial Pollution, Activity 2: Approaches to Establishing Best Available Techniques Around the World, 2018 [Электронный ресурс]. URL:

<https://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/approaches-to-establishing-best-available-techniques-around-the-world.pdf> (дата обращения: 17.10.22).

19. OECD // Best Available Techniques (BAT) for Preventing and Controlling Industrial Pollution, Activity 3: Measuring the Effectiveness of BAT Policies, 2019 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/measuring-the-effectiveness-of-best-available-techniques-policies.pdf> (дата обращения: 17.10.22).

20. OECD // Best Available Techniques for Preventing and Controlling Industrial Pollution, Activity 4: Guidance Document on Determining BAT, BAT-associated Environmental Performance Levels and BAT-based Permit Conditions, 2020 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/guidance-document-on-determining-best-available-techniques.pdf> (дата обращения: 17.10.22).

References

1. GOST R 56828.15-2016 Best available techniques. Terms and definitions. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200140738> [Accessed 15th October 2022].

2. ITS 19 – 2020 Manufacture of solid and other inorganic chemicals. Available from: http://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1506&etkstructure_id=1872 [Accessed 18th October 2022]

3. Kostyleva N.V., Shenfeld B.E., Buzmakov S.A. (2015) *To Implementation of Pollutants Atmospheric Emission Regulation Based on Best Available Techniques*. Vol. 19. No. 12. Pp. 30-35. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25006681> [Accessed 15th October 2022].

4. Russian Classification of Economic Activities. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200110162> [Accessed 17th October 2022].

5. Russian Classification of Product by Economic Activities. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200110164> [Accessed 17th October 2022].

6. Resolution of the Russian Government No. 1386 of 4 August 2022. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/351439814> [Accessed 17th October 2022].

7. Resolution of the Russian Government No. 2398 of 31 December 2020. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/573292854> [Accessed 16th October 2022].

8. Resolution of the Russian Government No. 143 of 13 February 2019. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/552405898> [Accessed 16th October 2022].

9. Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation No. 89 of 14 February 2019. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/542643374> [Accessed 17th October 2022].

10. Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation No. 780 of 22 October 2021. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/727092694> [Accessed 17th October 2022].

11. Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation No. 871 of 19 November 2022. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/727251276> [Accessed 17th October 2022].

12. Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation No. 581 of 11

August 2020. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/565780531> [Accessed 17th October 2022].

13. Decree of the Russian Government No. 2178-r of 31 October 2014. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/420230975> [Accessed 16th October 2022].

14. Federal Service for Supervision of Natural Resources. Available from: <https://rpn.gov.ru/news/ros-prirodnadzor-informiruet-o-nachale-ekspluatatsii-gisp-v-chasti-rassmotreniya-zayavok-na-polucheni/> [Accessed 17th October 2022].

15. The Federal law No. 219-FZ of 21 July 2014. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/420208818> [Accessed 15th October 2022].

16. The Federal law No. 7-FZ of 10 January 2002. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/901808297> [Accessed 17th October 2022].

17. Evrard Damien, Valerie Laforest, Jonathan Valliot and Rodolphe Gaucher (2016) Best Available Techniques as a Sustainability Tool in Manufacturing: Case Study in the Dairy Sector. *Procedia CIRP*. Pp. 520–525. Available from: <https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-01350886/file/2016-222.pdf> [Accessed 17th October 2022].

18. OECD (2018) Best Available Techniques (BAT) for Preventing and Controlling Industrial Pollution, Activity 2: Approaches to Establishing Best Available Techniques Around the World. Available from: <https://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/approaches-to-establishing-best-available-techniques-around-the-world.pdf> [Accessed 17th October 2022].

19. OECD (2019) Best Available Techniques (BAT) for Preventing and Controlling Industrial Pollution, Activity 3: Measuring the Effectiveness of BAT Policies. Available from: <https://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/measuring-the-effectiveness-of-best-available-techniques-policies.pdf> [Accessed 17th October 2022].

20. OECD (2020) Best Available Techniques for Preventing and Controlling Industrial Pollution, Activity 4: Guidance Document on Determining BAT, BAT-associated Environmental Performance Levels and BAT-based Permit Conditions. Available from: <https://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/guidance-document-on-determining-best-available-techniques.pdf> [Accessed 17th October 2022].

Статья поступила в редакцию 12.10.2022; одобрена после рецензирования 04.11.2022; принята к публикации 09.11.2022.

The article was submitted 12.10.2022; approved after reviewing 04.11.2022; accepted for publication 09.11.2022.

РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Краткое сообщение

УДК 574.52

<https://doi.org/10.17072/2410-8553-2022-2-53-60>

**Состав и структура фитопланктона водных объектов с экстремальными условиями
(Пермский край, Россия)**

Полина Геннадьевна Беляева¹

¹ Институт экологии и генетики микроорганизмов – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», Пермь, Россия

¹ belyaeva@psu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6741-0424>

Аннотация. На примере природного (р. Китенка) и искусственного (фильтрационные стоки ПТБО «Софроны» г. Пермь) водных объектов показана значительная трансформация фитопланктона под влиянием антропогенного воздействия. Целью настоящей статьи является оценка трансформации фитопланктона – изменение богатства видов и их экологии, численности и биомассы. В составе фитопланктона были выявлены эвгленовые, зеленые, диатомовые водоросли и цианопрокариоты, характерные для загрязненных эвтрофных вод. Проанализирована перестройка структуры альгоценозов, связанная с увеличением доли цианопрокариот (75% численности и 25% биомассы), эвгленовых (23% численности и 45% биомассы) или зеленых (20% численности и 30% биомассы) водорослей. Показано, что фитопланктон исследованных объектов характеризуется значительными колебаниями численности и биомассы независимо от сроков наблюдения. При чрезмерном антропогенном воздействии обнаружено угнетение альгоценозов, или их полная деградация.

Ключевые слова: фитопланктон, загрязнение, антропогенная трансформация, малые водные объекты, промышленные стоки.

Благодарности: Работа выполнена в рамках Государственного задания № НИОКТРАААА-А19-119112290008-4.

Для цитирования: Беляева П.Г. Состав и структура фитопланктона водных объектов с экстремальными условиями (Пермский край, Россия) // Антропогенная трансформация природной среды. 2022. Т. 8. № 2. С. 53–60. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2022-2-53-60>

SECTION 2. POLLUTION

Short Communications Article

**Composition and structure of phytoplankton in water objects with extreme conditions
(Perm region, Russia)**

Polina G. Belyaeva¹

¹ Institute of ecology and genetics of microorganisms of the Perm Research Centre of the Ural Branch Russian Academy of Sciences, Russia.

¹ belyaeva@psu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6741-0424>

Abstract. On the example of natural (river Kitenka) and artificial (leachate a municipal landfill "Sofony", Perm) water objects under the influence of anthropogenic impact, a significant transformation of phytoplankton was shown. The development of Euglenophyta, Chlorophyta and Cyanoprokaryotf, characteristic of polluted eutrophic waters, was revealed. The reorganization of the structure of algocenoses associated with an increase in the proportion of Cyanoprokaryota (75% of the abundance and 25% of the biomass), Euglenophyta (23% of the abundance and 45% of the biomass) or Chlorophyta (20% of the abundance and 30% of the biomass) algae was analyzed. The phytoplankton of the studied objects are characterized by significant fluctuations in abundance and biomass, regardless of the periods of observation. With excessive anthropogenic impact, inhibition of algocenoses, or their complete degradation, was found.

Key words: phytoplankton, pollution, anthropogenic transformation, industrial waste

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of State Assignment No. НИОКТРАААА-А19-119112290008-4.

For citation: Belyaeva, P., 2022. Composition and structure of phytoplankton in water objects with extreme conditions (Perm region, Russia). *Anthropogenic Transformation of Nature*, 8(2), pp. 53–61. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2022-2-53-60> (in Russian)

Введение

Как известно водоросли способны жить и размножаться в таких условиях, которые на первый взгляд кажутся совершенно непригодными для жизни: в горячих источниках, температура которых достигает иногда почти точки кипения, в арктических водах с минусовой температурой, а также на снегу и льду. Главными факторами, которые влияют на развитие водорослей, являются наличие влаги, света, температурного режима, углерода, органических и минеральных удобрений [7, 10]. Поэтому водоросли вегетируют даже в экстремальных водах.

В планктоне водных экосистемах с экстремальными условиями наблюдается развитие эвгленовых, зеленых водорослей и цианопрокариот, характерных для загрязненных эвтрофных вод [6], массовое развитие получают виды-индикаторы нетоксичного автохтонного и аллохтонного органического загрязнения природных вод [15]. Для стоячих водоемов (лужи, болота и малые водоемы) с большим количеством органических веществ, эти водоросли способны вегетировать во все сезоны года. Они часто дают вспышки развития после внесения ядохимикатов или солей азота и фосфора. Большинство видов выдерживает широкий диапазон pH 5.5–8.8 и температуры от 0 до 30°C. Эти виды также обнаружены в сточных водах предприятий, в искусственных водоемах очистных сооружений сахарных заводов и городской канализации [2, 7, 8, 10]. Например, *Euglena gracilis* Klebs. встречается в больших количествах в гниющих лужах, канавах, в сырой земле рядом с ними, в мелких пресноводных водоемах, сильно загрязненных легко разлагающимися органическими веществами; виды рода *Ankistrodesmus* очень быстро размножаются автоспорами, они интенсифицируют очистку сточных вод в биологических прудах и картах полей фильтрации городских очистных сооружений.

Водные объекты Пермского края в разной степени подвержены антропогенному воздействию. Большинство из них испытывает существенное влияние сточных вод многочисленных предприятий добывающей и перерабатывающей промышленности и сельского хозяйства. Малые водные объекты, в первую очередь реагируют на хозяйственную деятельность человека, так как обладают пониженной способностью к самоочищению и быстрее загрязняются.

На территории края есть водные объекты, которые формируются на антропогенно-преобразованных участках, и являются экстремальным для развития в них биоты. К таким условиям можно отнести воды р. Китенка и стоки загрязненных фильтрационных и инфильтрационных вод ПТБО, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду [6, 12, 13].

Цель работы – изучить состав и структуру фитопланктона природного (р. Китенка) и искусственного (фильтрационные стоки ПТБО «Софроны» г. Перми) водных объектов с экстремальными условиями.

Материал и методика

Исследования были выполнены в весенний и осенний периоды на водоемах ПТБО «Софроны» в 2011–2014 гг. и в р. Китенка в 2016 г. Отбор и обработку проб фитопланктона, объемом 1 л, проводили по стандартным методикам [7, 9, 11]. Пробы планктона концентрировали фильтрованием с использованием мембранных фильтров «Владипор» с диаметром пор 1.2–3 мкм. Водоросли подсчитывали в камере «Учинская» с использованием микроскопа ZEISS Axiostar Plus (Germany) при 700-кратном увеличении. При их анализе определяли видовой состав, численность и биомассу водорослей, отмечали доминирующие виды, к которым относили виды с относительной численностью или биомассой > 10% от суммарной. Экологическую принадлежность водорослей устанавливали по сводке С.С. Бариновой с соавторами [1]. Для оценки разнообразия использовали индекс Шеннона–Уивера [14].

Водные массы обводного канала полигона твердых бытовых отходов (ПТБО) «Софроны», расположенного в г. Перми. Полигон расположен в 12 км от города и занимает 52 га, достигает в высоту 20–30 м. В «старой холодной секции» ирригационного канала в южной части полигона выявлено более 1000 органических поллютантов, наиболее распространены фенольные соединения, фталаты, фосфаты, кетоны, трептоноиды, трепены, бензойные кислоты, нитрозо-соединения и др. [12, 13]. В воде повышено содержание сульфатов, хлоридов, магния, кальция, натрия, железа и др. металлов, щелочности и общей жесткости. Высоко загрязнение вод по ХПК, аммоний, нитратам, нитритам фосфору общему. Цветность вод высокая.

Река Китенка, приток р. Юг, длиной около 3 км, глубина 0.2–0.8 м, принимает стоки ООО «Юговской комбинат молочных продуктов» («ЮКМП»). Сточные воды молочного комбината придают природным водам белизну и мутность, ослабевающую вниз по течению. Воды реки характеризуются как «очень грязные». Осенью р. Китенка представляла собой мутный поток в виде смеси эмульсионной и суспензионной дисперсных систем. Тогда как в середине мая водные массы р. Китенка были насыщены растворенным кислородом и были намного прозрачнее. Содержание взвешенных веществ в мае выше допустимых норм в 2–3 раза, осенью – в 10–13 раз. По содержанию аммония, нитритов и нитратов воды превышают ПДК и характеризуются как загрязненные или очень грязные (IV – VI класс качества) [6].

Результаты

Состав фитопланктона. Во временных водоемах на территории ПТБО за период исследований идентифицировано 45 таксонов водорослей рангом ниже рода с преобладанием зеленых водорослей (рис. 1), ежегодно отмечается от 3 до 12 таксонов водорослей. Каждый отбор проб (весна и осень 2011–2014 гг.) сопровождается сменой таксономического состава. Зеленые водоросли в разное сроки представлены одноклеточными (*Chlorococcum* spp.) и колониальными хлорококковыми (*Pediastrum duplex* Meyen и

Ankistrodesmus sp., *Oocystis borgei* Snow) или вольвоксовыми (*Chlamydomonas*: *C. acuta* Korsh. – доминантный вид, *C. parvula* Gerloff, *C. ehrenbergii* Gorozhankin [Goroschankin], *Chlamydomonas* sp.). Эвгленовые водоросли – *Phacus circulatus* Pochmann, *P. pyrum* (Ehr.) W. Archer, *P. caudatus* Hübner, *Euglena pisciformis* Klebs, *E. gracilis* Klebs. Реже в 66% проб были обнаружены цианопрокариоты (*Aphanothece*, *Pseudoanabaena*, *Planktolyngbya limnetica* (Lemm.) J. Komárková-Legnerová & G. Cronberg) и криптофитовые водоросли (*Cryptomonas marssonii* Skuja, *Cryptomonas* sp.), еще реже – диатомовые родов *Navicula*, *Nitzschia*, *Surirella*, *Encyonema* и *Achnanthes*.

В реке Китенка разнообразие фитопланктона составило 39 таксонов. Диатомовые водоросли (Bacillariophyta) в фитопланктоне составляют 49% флористического списка и присутствуют в течение всего периода исследований (рис. 1 / fig. 1). Наиболее представлены во флоре *Nitzschia* и *Navicula* (по 5 видов и внутривидовых таксонов), *Fragilaria* (3) и *Stephanodiscus* (3). Второй крупный отдел (20% общего богатства видов) – эвгленовые водоросли: *Euglena* (4 вида), *Trachelomonas* (2) и *Phacus* (2). Зеленые водоросли

представлены 6 таксонами, наиболее распространенными среди них являются представители рода *Chlamydomonas* (3). Цианопрокариоты по богатству видов также как зеленые составляют (15%).

Непосредственно ниже впадения стоков «ЮКМП» водорослевая компонента в реке отсутствует. Ниже по течению сообщество фитопланктона представлено неактивными, выцветшими клетками, иногда с полуразрушенными оболочками. Здесь присутствует только нитчатая *Planktolyngbya* sp. В устье р. Китенки в фитопланктоне идентифицировано 17 таксонов из 4 отделов водорослей. Диатомовые включают 7–10 таксонов в разные сроки отбора проб (*Nitzschia acicularis* (Kütz.) W. Sm., *N. palea* (Kütz.) W. Sm., *N. sigmoidea* (Ehr.) W. Sm., *Fragilaria capucina* Desm.), зеленые – представленные родом *Chlamydomonas* (*C. reinhardtii* Dang., *C. elliptica* Korsh., *C. pseudoperlyti* Pasch.), эвгленовые – пятью крупноразмерными представителями родов *Trachelomonas* и *Euglena*, из цианопрокариот – виды рода *Planktolyngbya*. Такой состав водорослей характерен для стоячих водоемов с большим количеством органических веществ (эвтрофные воды).

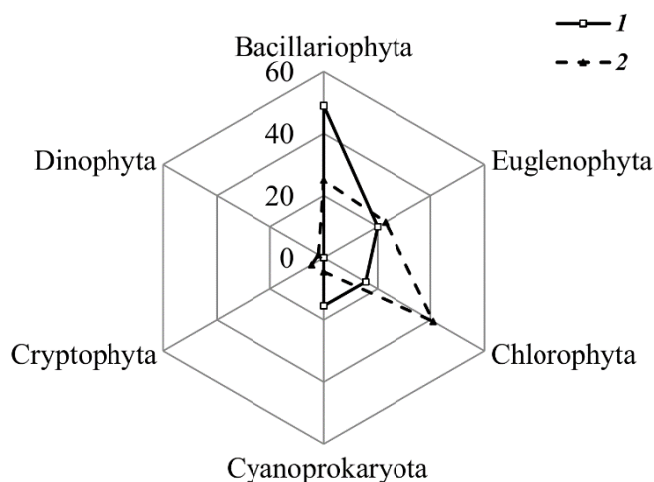


Рис. 1. Структура фитопланктона антропогенно-преобразованных водных объектов.

(Примечание: приведен вклад отделов водорослей (%) в структуру планктона р. Китенка (1) и фильтрационных вод ПТБО «Софроны» (2))

Fig. 1. Structure of phytoplankton of anthropogenically transformed water bodies

(Note: the contribution of algal divisions (%) in structure the plankton of the river is given tu river Kitenka (1) and leachate a municipal landfill «Sofrony» (2))

Эколого-географический спектр водорослей.

В альгофлоре временных водоемов на территории ПТБО преобладают планктонные формы (33.3%). По географической принадлежности основу флоры составляют космополиты (45%). По отношению к солености – олигогалобы (35%). Среди водорослей, выявленных в составе альгофлоры 53.4% являются показателями сапробности. По отношению к концентрации органических веществ состав водорослей-индикаторов на 22% образован β -мезосапробными формами, на 10% – видами, развивающимися в переходной зоне между β -мезо- и олигосапробной. Водорослей, характеризующих воды высокими показателями сапробности – 17%, с низкими – 4%.

В альгофлоре р. Китенка преобладают планктонно-бентосные виды (28% видового состава). По географической принадлежности основу фитопланктона составляют космополиты (70%). Присутствуют *Surirella grunowii* Kulikovskiy, Lange-Bertalot & Witkovski – бореальный вид и *Crucigenia fenestrata* (Schmidle) Schmidle – голарктический вид, эвглен (*Euglena deses* Ehr., *E. viridis* Ehr.). По отношению к pH среды виды алкалофилы составляют 65% и индифференты – 35%. Среди водорослей, выявленных в составе альгофлоры, 77.5% являются показателями сапробности. По отношению к концентрации органических веществ состав водорослей-индикаторов на 32% образован β -мезоса-

пробными формами, на 10% – олигосапробами, на 23% – видами, развивающимися в переходной зоне между β -мезо- и олигосапробной. Водорослей, характеризующих воды высокими показателями сапробности – 19%, с низкими – 16% (табл. 1 / table 1).

Эколого-географическая характеристика показывает увеличение в фитопланктоне вод с экстремальными условиями широко распространенных видов, индифферентных по отношению к рН и солености воды, преобладание β -мезосапробов и увеличение доли видов с более высокими показателями сапробности.

Таблица 1

Эколого-географическая характеристика фитопланктона антропогенно-преобразованных водных объектов

Table 1

Ecological and geographical characteristics of phytoplankton anthropogenically transformed water bodies

Характеристика // Characteristic	% от числа видов*	
	р. Китенка // river Kitenka	водоемы ПТБО // leachate a municipal landfill
Распространение // Distribution		
Космополиты // Cosmopolites	70	45
Бореальные // Boreal	2	2
Аркто-альпийские // Arctic-alpine	2	2
Галобность // Galobnost		
Галофилы // Halophiles	21	4
Индифференты // Indifferenty	68	27
Мезогалобы // Mezagaloby	5	2
Местообитание // Habitat		
Планктонные // Plankton	13	33
Бентосные // Benthic	25	7
Планктонно-бентосные // Plankton-benthic	28	7
рН приуроченность // рН		
Индифференты // Indifferenty	35	24
Алкалифилы // Alkalify	65	16
Сапробность // Saprobity		
α - β -(β - α)-мезосапробы // α - β -(β - α)-mesosaprob	23	10
β -мезосапробы // β -beta-mesosaprob	32	22
α , β - α -(α - β) и α - ρ -(ρ - α) // α , β - α -(α - β) и α - ρ -(ρ - α)- saprob	19	17

*Примечание:

Процент видов каждой эколого-географической группы дан от общего числа видов

*Note:

The percentage of species of each ecological and geographical group is given from the total number of species

Структура фитопланктона. Структура фитопланктона водных объектов ПТБО «Софроны» г. Перми характеризуется не только различием в составе водорослей, но и в их количественном развитии. Для этих альгоценозов не отмечено сезонных и межгодовых закономерностей изменения состава и количественного развития (рис. 2 / fig. 2), для каждой пробы характерен свой доминантный комплекс видов (табл. 2). В таких пробах чаще других доминируют

зеленые водоросли как хлорококковые (*Chlorella*, *Chlorococcum*), так и вольвоксовые (*Chlamydomonas*: *C. acuta*, *C. incerta* Pascher, *C. Elliptica* Korsh., *C. minima* Korsh.). По биомассе часто (в 72% проб) преобладают эвгленовые (*Phacus pyrum*, *P. caudatum* и *Euglena pisciformis*, *E. gracilis*). Цианопрокариоты (*Aphanothece*) и криптофитовые водоросли (*Cryptomonas marsonii*, *Cryptomonas* sp.) обнаруживаются реже, в 66% проб.

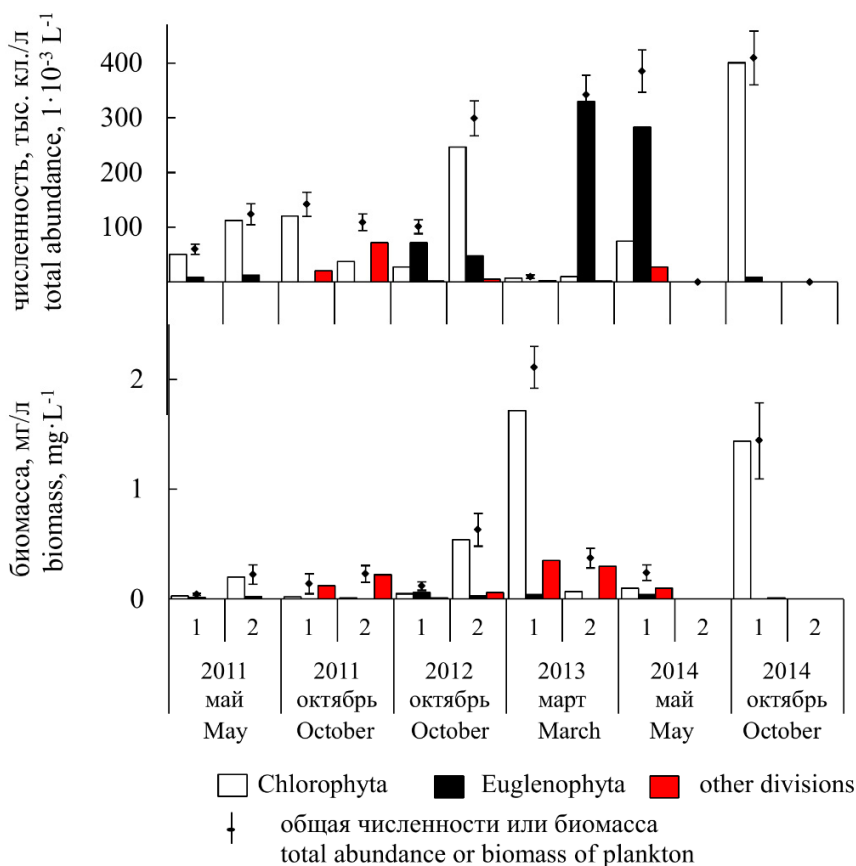


Рис. 2. Вклад отделов водорослей в структуру численности и биомассы в водных объектах на территории ПТБО «Софроны» г. Перми

Fig. 2. The contribution of algal divisions to the structure of abundance and biomass in leachate a municipal landfill «Sofrony»

Таблица 2

Доминантные виды водорослей в водных объектах на территории ПТБО «Софроны» г. Перми

Table 2

Dominant species of algae leachate a municipal landfill «Sofrony»

Сроки отбора // Selection deadlines	Количество таксонов // number of species	Доминантные виды, % // Dominant species, %	
		по численности // abundance	по биомассе // biomass
2011 весна // spring	11	<i>Oocystis borgei</i> (85)	<i>Oocystis borgei</i> (55), <i>Phacus circulatus</i> (25)
2011 осень // autumn	25	<i>Planktolyngbya limnetica</i> (40), <i>Aphanothece sp.</i> (25), <i>Oocystis borgei</i> (13)	<i>Oocystis borgei</i> (42), <i>Phacus circulatus</i> (16), <i>Euglena proxima</i> (10)
2012 осень // autumn	12	<i>Aphanothece sp.</i> (51) <i>Chlorococcum spp.</i> (10)	<i>Phacus pyrum</i> , <i>P. caudatus</i> , <i>Euglena pisciformis</i> , <i>E. gracilis</i> (68)
2013 весна // spring	4	<i>Euglena spp.</i> (43), <i>Ankistrodesmus sp.</i> (40)	<i>Euglena</i> (60), <i>Pediastrum duplex</i> (13)
2013 осень // autumn	5	<i>Planktolyngbya limnetica</i> (67), кокки (10)	<i>Euglena sp.</i> (76)
2014 весна // spring	14	<i>Aphanothece sp.</i> (72)	<i>Chlamydomonas spp.</i> (50), <i>Oocystis borgei</i> (26), <i>Aphanothece sp.</i> (10)
2014 осень // autumn	16	<i>Chlamydomonas acuta</i> (85)	<i>Chlamydomonas acuta</i> (57), <i>Chlamydomonas monadina</i> (36)

В р. Китенка на удалении от стоков ЮКМП сперва понижается доля неактивных выцветших клеток, развиваются нитчатые цианобактерии (*Planktolyngbya limnetica*), формирующие 75–99% численности и око-

ло 20–52% биомассы фитопланктона, весной их доля выше (рис. 3 / fig. 3). Ниже по течению присутствуют диатомовые и зеленые водоросли, которые формируют по 1% численности и до 15% биомассы. Индекс

Шеннона был очень низкий, по биомассе достигал 1.45, по численности 1.87. В устье реки Китенка индекс разнообразия увеличивался до 2.38 по биомассе и 2.54 по численности, несмотря на это в фитопланктоне все еще присутствовали неактивные выцветшие клетки. Диатомовые водоросли формировали до 72% биомассы, при доминировании *Navicula tuscula* (Ehr.) Grun. и *Placoneis exigua* (W.Gregory) Mereschkovsky.

Эвгленовые – 10% биомассы за счет 2 родов *Trachelomonas* и *Euglena* (таблица 3 / table 3). Присутствующие в больших количествах *Euglena viridis*, *E. denses* – полисапроб, *Phacus circulatoris*, характерны для сточных вод разных предприятий и биологических очистных сооружений. На данном участке весной отмечается увеличение (в 2.5–3 раза) численности и биомассы фитопланктона.

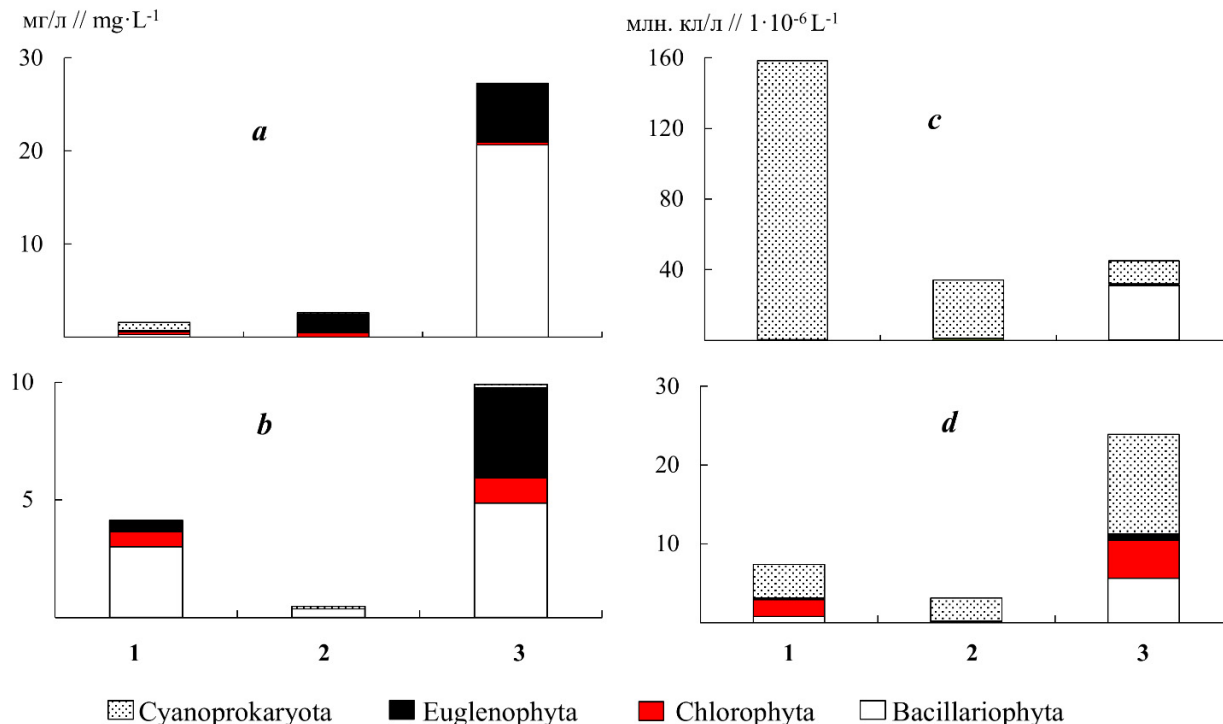


Рис. 3. Вклад отделов водорослей в структуру биомассы (a, b) и численности (c, d) фитопланктона р. Китенки в весенний (a, c) и осенний (b, d) периоды

(Примечание: 1 – р. Китенка ниже стока ОС «ЮКМП»; 2 – устье р. Китенка; 3 – р. Юг слияние с р. Китенкой)

Fig. 3. Contribution of algal divisions to the structure of biomass (a, b) and abundance (c, d) of phytoplankton Kitenka river in spring (a, c) and autumn (b, d) periods

(Note: 1 – the Kitenka river below the runoff of the treatment facilities; 2 – the river mouth Kitenka; 3 – Yug river confluence with the Kitenka river)

Таблица 3

Доминантные виды водорослей р. Китенка

Table 3

Dominant species of algae of river Kitenka

Места отбора проб // Sampling locations	Доминантные виды // Dominant species	
	Май // May	Сентябрь // September
ниже стоков // belowe ffluent stream	<i>Planktolyngbya</i> sp.	<i>Planktolyngbya</i> sp.
среднее течение // middle river	<i>Planktolyngbya limnetica</i> (99%N; 52%B), <i>Chlamydomonas</i> spp. (<1%N; 13%B), <i>Nitzschia</i> sp. (<1%N; 12%B)	<i>Planktolyngbya</i> spp. (57%N; 1%B), <i>Aneumastus tusculus</i> (11%N; 70%B), <i>Chlamydomonas</i> spp. + <i>Pediastrum tetras</i> (30%N; 16%B), <i>Trachelomonas</i> spp. (10%B)
устье реки // river mouth	<i>Planktolyngbya limnetica</i> (95%N; 7%B), <i>Phacus orbiculatus</i> + <i>Euglena viridis</i> (3%N; 5%B), <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> (1%N; 7%B)	<i>Planktolyngbya limnetica</i> + <i>Aphanizomenon flos-aqua</i> (93%N; 21%B), <i>Aneumastus tusculus</i> (4%N; 70%B)

Заключение

По сравнению с фитопланктоном предгорных рек Пермского Предуралья или Камского и Воткинского водохранилищ, где преобладают диатомовые и зеленые водоросли, в планктоне р. Китенка и фильтрационных стоках ПТБО «Софроны» г. Перми наблюдаются изменения в соотношении отделов водорослей, в составе альгофлоры преобладают виды эвгленовых, зеленых водорослей и цианопрокариот, характерных для эвтрофных вод. В ходе исследования автотрофного звена в антропогенно-преобразованных водах в условиях значительного антропогенного воздействия нами показано, что происходит увеличение количественного развития альгоценозов, наблюдается перестройка структуры альгоценозов, связанная с увеличением доли цианопрокариот (75% численности и 25% биомассы), эвгленовых (23% численности и 45% биомассы) или зеленых (20% численности и 30% биомассы) водорослей. При этом каждая проба фитопланктона является специфической, со своим комплексом доминантных видов водорослей. При чрезмерном антропогенном воздействии происходит угнетение альгоценозов, или их полная деградация. На каждом участке альгоценозы характеризуются широко варьирующими значениями численности и биомассы, независимо от сроков наблюдения. Направленные тренды изменения численности и биомассы, характерные для фитопланктона рек и водохранилищ в условиях региона в водах с экстремальными условиями – отсутствуют.

Список источников

1. *Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В.* Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Pilies Studio, 2006. 498 с.
2. *Бачура Ю.М., Храменкова О.М.* Водоросли почв полигона твердых бытовых отходов и некоторых улиц г. Гомеля // *Вестник МДПУ імя І. П. Шамякіна. Біялагічныя навукі.* 2011. №3. С. 3–9.
3. *Беляева П.Г.* Видовой состав и структура фитопланктона Камского водохранилища // *Вестник Пермского университета. Биология.* 2013. № 3. С. 4–11.
4. *Беляева П.Г.* Состав и структура фитоперифитона реки Сылва (Пермский край). // *Ботан. журн.* 2014. Т. 99. № 8. С. 903–916.
5. *Беляева П.Г.* Многолетняя динамика состава и распределения фитопланктона Воткинского водохранилища (бассейн Камы, Пермский край) // *Ботанический журнал.* 2018. 103(3): 297–312.
6. *Беляева П.Г., Кадочникова П.И., Галямина В.В., Саралов А.И.* Влияние сточных вод на гидрохимические, микробиологические и альгологические характеристики малой реки Юг (Пермский край) // *Вода: химия и экология.* 2017. № 4. С. 22–28.
7. *Вассер С.П., Кондратьева Н.В., Масюк Н.П. и др.* Водоросли: Справочник. Киев: Наук. думка. 1989. 608 с.
8. *Ветрова З.И.* Флора водорослей континентальных водоемов Украины. Эвгленофитовые водоросли. Вып. 1. Ч. 2. Киев: Наук. Думка, 1993. 260 с.

9. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: 1975. 239 с.

10. Определитель пресноводных водорослей СССР. Общая часть. Вып. 1. / под ред. М.М. Голлербаса, В.И. Полянского. М.: Совет. Наука, 1951. 200 с.

11. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / под ред. В. А. Абакумова. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 239 с

12. *Шаравин Д.Ю.* Разнообразие культивируемых протеобактерий в фильтрационных водах полигона захоронения твердых бытовых отходов // *Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН (электронный журнал).* 2014. № 3. С. 1–11.

13. *Шаравин Д.Ю., Саралов А.И.* Предварительное описание нового вида галофильной метилюктерии рода *Methylophaga* из фильтрата полигона захоронения твердых бытовых отходов // *Вестник пермского университета. Биология.* 2015. Вып. 4. . 346–351.

14. *Shannon, Weaver, W.* A mathematical theory of communication. Urbana, The University of Illinois Press, 1963. p.25.

15. *Sládeček V.* System of Water Quality from the Biological Point of View. – *Arch. Hydrobiol. Beih.* 7. *Ergebnisse der Limnologie.* 1973. V. 7. 218 p.

References

1. *Barinova, S., Medvedeva, L. and Anisimova, O.,* 2006. *Bioraznoobrazie vodoroslei – indikatorov okruzhayuthei sredy* [Diversity of algal indicators in environmental assessment]. TelAviv, Pilies Studio. 498 p. (in Russian)
2. *Bachura, Y. and Khranchenkova, O.,* 2011. *Vodorosli pochv poligona tverdykh bytovykh otkhodov i nekotorykh ulits g. Gomelya* [Algae in the soils of the landfill for solid household waste and some streets in the city of Gomel]. *Vesnik MDPU named after I. P. Shamyakina. Bialagichny navuki.* (3). pp. 3–9. (in Russian)
3. *Belyaeva, P.,* 2013. *Vidovoy sostav i struktura fitoplanktona Kamskogo vodokhranilishcha* [Species composition and structure of phytoplankton of the Kama reservoir]. *Bulletin of the Perm University. Biology.* (3). pp. 4–11. (in Russian)
4. *Belyaeva, P.,* 2014. *Sostav i struktura fitoperifitona reki Sylva (Permskiy kray)* [Composition and structure of phytoperiphyton in the Sylva river (Perm territory)]. *Botanical journal.* 99(8). pp. 903–916. (in Russian)
5. *Belyaeva, P.,* 2018. *Mnogoletnyaya dinamika sostava i raspredeleniya fitoplanktona Воткинского водохранилища (basseyn Kamy, Permskiy kray)* [Long-term dynamics of the composition and distribution of phytoplankton in the Вотkinsk reservoir (Kama basin, Perm region)]. *Botanical journal.* 103(3). pp. 297–312. (in Russian)
6. *Belyaeva, P., Kadochnikova, P., Galyamina, V. and Saralov, A.,* 2017. *Vliyaniye stochnykh vod na gidrokhimicheskiye, mikrobiologicheskiye i algologicheskiye kharakteristiki maloy reki Yug (Permskiy kray)* [Influence of wastewater on hydrochemical, microbiological and algological characteristics of the small river Yug (Perm Territory)]. *Water: chemistry and ecology.* (4). pp. 22–28. (in Russian)

7. Vasser, S., Kondrateva, N., Masyuc, N., et al. 1989. *Vodorosli: Spravochnik* [Algae]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 608 p. (in Russian)
8. Vetrova, Z., 1993. *Flora vodoroslej kontinental'nykh vodoemov Ukrainy. Evglenofitovy'e vodorosli. Vy p. 1. Ch. 2.* [Algal flora of continental watercourses of Ukraine. Euglenophyta. Vol. 1 Part 2]. Kiev, Naukova Dumka, 260 p. (in Russian)
9. Metodika izucheniya biogeotsenozov vnutrennikh vodoyemov [Methodology for the study of inland waters' biogeocenosis] Moskva. 1975. 239 p. (in Russian)
10. Gollerbach, M. and Polianskii, V., (ed), 1951. *Opredelitel' presnovodnykh vodorosley SSSR. Obshchaya chast'* [Identification guide for freshwater algae of the USSR. Common part]. Moscow. 200 p. (in Russian)
11. Abakumov, V., (ed), 1983. *Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverkhnostnykh vod i donnykh otlozhenii* [Guide on the Methods of Hydrobiological Analysis of Surface Water and Bottom Sediments], Leningrad, Gidrometeoizdat. 239 p. (in Russian)
12. Sharavin, D., 2014. Diversity of cultivated proteobacteria in a municipal landfill Irrigation canal. *Bulletin of the Orenburg scientific center of the UB RAS*, (3), pp. 1–11. (in Russian)
13. Sharavin, D. and Saralov, A., 2015. Preliminary description of a novel species of halophilic methylobacteria of Methylophaga genus from the landfill leachate. *Bulletin of Perm University. Biology*, (4). pp. 346–351. (in Russian)
14. Shannon, C. and Weaver, W. 1963. A mathematical theory of communication. Urbana, The University of Illinois Press. p. 25.
15. Sladeczek, V., 1973. System of water quality from the biological point of view. *Achieves für Hydrobiologie - Beiheft Ergebnisse der Limnologie*. 7(1), pp. 1–218.

Статья поступила в редакцию 06.10.2022; одобрена после рецензирования 26.10.2022; принята к публикации 07.11.2022.

The article was submitted 06.10.2022; approved after reviewing 26.10.2022; accepted for publication 07.11.2022.

РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Краткое сообщение

УДК 547.91

<https://doi.org/10.17072/2410-8553-2022-2-61-66>

Особенности распределения содержания нефтепродуктов в почвах, дорожной пыли и снеге по мегапрофилю в Ростовской области

Юрий Александрович Федоров¹, Андрей Николаевич Кузнецов², Леонид Юрьевич Дмитрик³, Елена Вячеславовна Кузнецова⁴, Ольга Юрьевна Бэллинджер⁵

^{1,2,3,4,5} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ fedorov@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7411-3030>

² ankuznecov@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9693-9383>

³ ldmitrik@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6314-1383>

⁴ elkuznecova@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-00031014-3171>

⁵ obellindzher@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9890-2464>

Аннотация. В последние несколько десятилетий огромные масштабы добычи, транспортировки и переработки сырой нефти обусловили широкое распространение загрязнения почв сырой нефтью и нефтепродуктами. Таким образом, их перманентное присутствие в окружающей среде, и, как следствие в почвах, обязано естественному и антропогенному происхождению. Авторами были проведены экспедиционные исследования с целью отбора проб почвы, пыли и снега по маршруту «п. Маргаритово (побережье Азовское море) - г. Шахты (Восточный Донбасс)». Протяженность профиля составила более 150 км. В полученных образцах была определена массовая концентрация нефтепродуктов. Анализ массива данных показал, что содержание нефтепродуктов в почвах Ростовской области следует оценить, как изменяющееся от допустимого до среднего. Сделан вывод, что дорожная пыль и снег являются одними из доминирующих источников загрязнения почв Ростовской области нефтепродуктами.

Ключевые слова: нефть, антропогенная нагрузка, педосфера, атмосферные осадки, побережье Азовского моря, Восточный Донбасс

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках госзадания в сфере научной деятельности № 0852–2020–0029.

Для цитирования: Федоров Ю.А., Кузнецов А.Н., Дмитрик Л.Ю., Кузнецова Е.В., Бэллинджер О.Ю. Особенности распределения содержания нефтепродуктов в почвах, дорожной пыли и снеге по мегапрофилю в Ростовской области // Антропогенная трансформация природной среды. 2022. Т. 8. № 2. С. 61–66. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2022-2-61-66>

SECTION 2. POLLUTION

Short Communications Article

Features of oil products content distribution in soils, road dust and snow according to the mega profile in the Rostov region

Yuri A. Fedorov¹, Andrey N. Kuznetsov², Leonid Yu. Dmitrik³, Elena V. Kuznetsova⁴, Olga Yu. Ballinger⁵

^{1,2,3,4,5} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹ fedorov@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7411-3030>

² ankuznecov@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9693-9383>

³ ldmitrik@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6314-1383>

⁴ elkuznecova@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-00031014-3171>

⁵ obellindzher@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9890-2464>

Abstract. In the last few decades, the enormous scale of crude oil extraction, transportation and processing has caused widespread pollution of soils with crude oil and oil products. Thus, its permanent presence in the environment, and, as a consequence, in soils, is due to natural and anthropogenic origin. The authors have conducted expeditionary research in order to take soil, dust and snow samples along the route "Margaritovo (coast of the Sea of Azov) – Shakhty (Eastern Donbass)". The profile extension is more than 150 km. The oil products mass concentration has been deter-

mined in the samples collected. The data set analysis has showed that the oil products content in the soils of the Rostov region should be assessed as varying from acceptable to average. It is concluded that road dust and snow are one of the dominant sources of soil pollution in the Rostov region with oil products.

Key words: oil, anthropogenic load, pedosphere, atmospheric precipitation, Sea of Azov coast, Eastern Donbass

Acknowledgments: The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state task framework in the field of scientific activity № 0852-2020-0029

For citation: Fedorov, Yu., Kuznetsov, A., Dmitrik, L., Kuznetsova, E., Ballinger, O., 2022. Features of oil products content distribution in soils, road dust and snow according to the mega profile in the Rostov region. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 8(2), pp. 61–66. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2022-2-61-66> (in Russian)

Введение

Нефть и нефтепродукты (НП) представляют собой сложные смеси, состоящие из нескольких сотен индивидуальных углеводородов и других соединений. Согласно доминирующей и наиболее аргументированной теории, сырая нефть является продуктом преобразования органического вещества в осадочных горных породах. В результате действия различных природных и техногенных процессов она может выноситься на земную поверхность. Кроме того, многие содержащиеся в нефти углеводороды в больших количествах вырабатываются живыми организмами. В последние несколько десятилетий огромные масштабы добычи, транспортировки и переработки нефти обусловили широкое распространение загрязнения окружающей среды сырой нефтью и НП [15]. Таким образом, их перманентное присутствие в окружающей среде, в т.ч. в атмосферных выпадениях и почвах [16], связано как с природными, так и с антропогенными источниками [1], [2], [6], [12], [14].

Исследования уровней содержания нефти и НП в черноземах Ростовской области показали, что ингибирующее воздействие на их биологическую активность оказывают только высокие дозы загрязнения этими органическими веществами [5]. Они могут формироваться как в результате катастрофических разливов сырой нефти и НП, так и вследствие длительного хронического загрязнения, вызванного разведкой и разработкой нефтяных и газовых месторождений, выбросами автотранспорта и работой силовых энергетических установок [7], [10], [12], [13], [15].

Поэтому в настоящее время чрезвычайно актуально изучение современных уровней содержания НП в черноземных почвах области, расположенных как вблизи, так и на удалении от городских агломераций и производственных центров для обнаружения зон с повышенными дозами загрязнения. Не менее важным с научной и практической точек зрения является исследование роли дорожной пыли и снега как одних из вероятных источников загрязнения почв нефтепродуктами.

Объект, материалы и методы

Авторами были проведены экспедиционные исследования в зимний период 2022 г. с целью отбора проб почв, дорожной пыли и снега по маршруту «с. Маргаритово (побережье Азовского моря) – г. Шахты (Восточный Донбасс)». Протяженность профиля составила более 150 км.

Во время проведения экспедиции температура воздуха достигала -5 – -2°C . Она возрастала с севера на юг. Скорость ветра варьировалась в диапазоне 2,0–3,5 м/с (направление ЮЗ), давление – 758–766 мм рт. ст. Ночью с 19.01.22 на 20.01.22 выпал снег. Снегопад продолжался и во время проведения экспедиции. Пробы были отобраны на 10 станциях согласно маршруту экспедиции г. Шахты – с. Маргаритово (рис.1). При выполнении станций производился единовременный отбор проб в компонентах элементарных ландшафтов - дорожной пыли, почве и свежевыпавшем снеге, для определения в них массовой концентрации НП.

Транспортировка и хранение проб почвы и дорожной пыли были проведены согласно требованиям [4], снега [3]. Определение массовой доли нефтепродуктов в отобранных образцах проводилось в Институте наук о Земле ЮФУ флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02» согласно методикам [8, 9]. По этим методикам в качестве растворителя принят гексан, экстрагирующий неполярные и малополярные углеводородные соединения нефти (алифатические, алициклические, ароматические), а также вводятся поправка на потери летучих соединений. Таким образом, нами были определены только нефтяные углеводороды (НУ), в то время как, например, в работах [6, 12, 13] для научных и практических целей определялась также отдельно сумма смол и асфальтенов (сумма смолистых компонентов). При сравнении с нашими более ранними результатами брались сведения, полученные путем определения только растворенных углеводородов по методикам [3], т.е. так же, как это представлено в работах [10, 15].

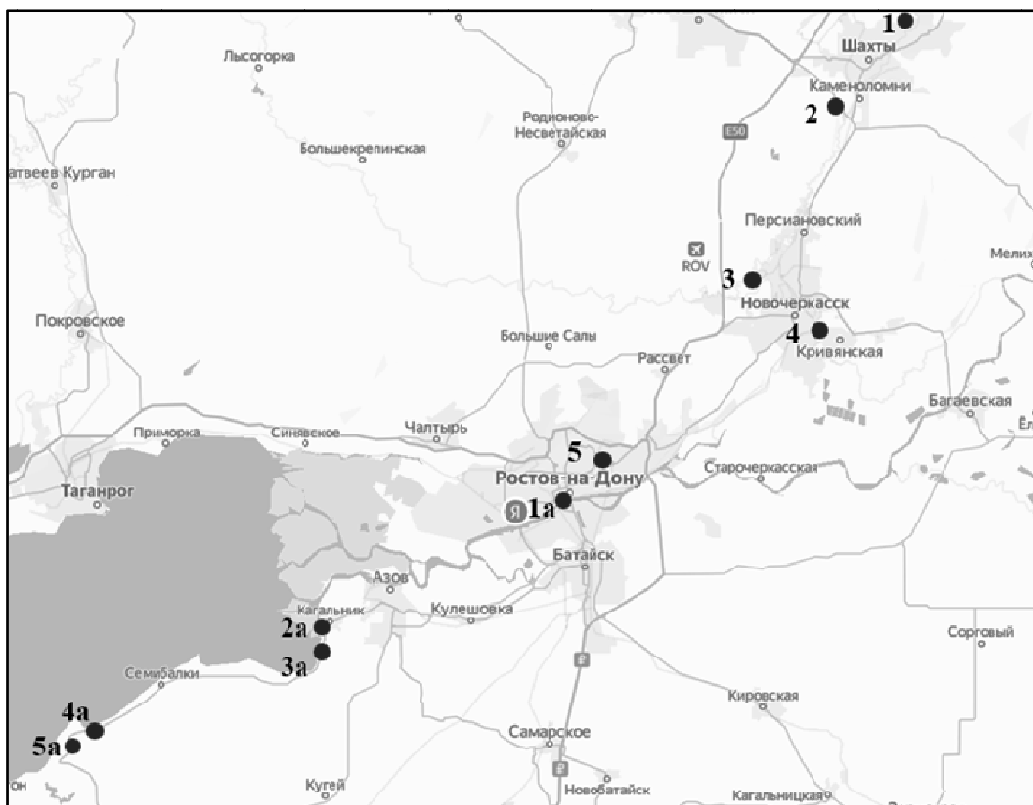


Рис. 1. Картограмма района исследования

Fig. 1. The research area map-scheme

Обсуждение результатов

Согласно данным исследований, содержание нефтепродуктов в дорожной пыли варьировалось в пределах 40,7–4683,1 (среднее – 1991,6) мг/кг сухого ве-

са (рис. 2 / fig. 2). Максимальная концентрация нефтепродуктов была зарегистрирована в пробе, отобранной на дороге вблизи парка Островского г. Ростова-на-Дону (ст. 5), минимальная – в х. Береговой (ст. 3а).

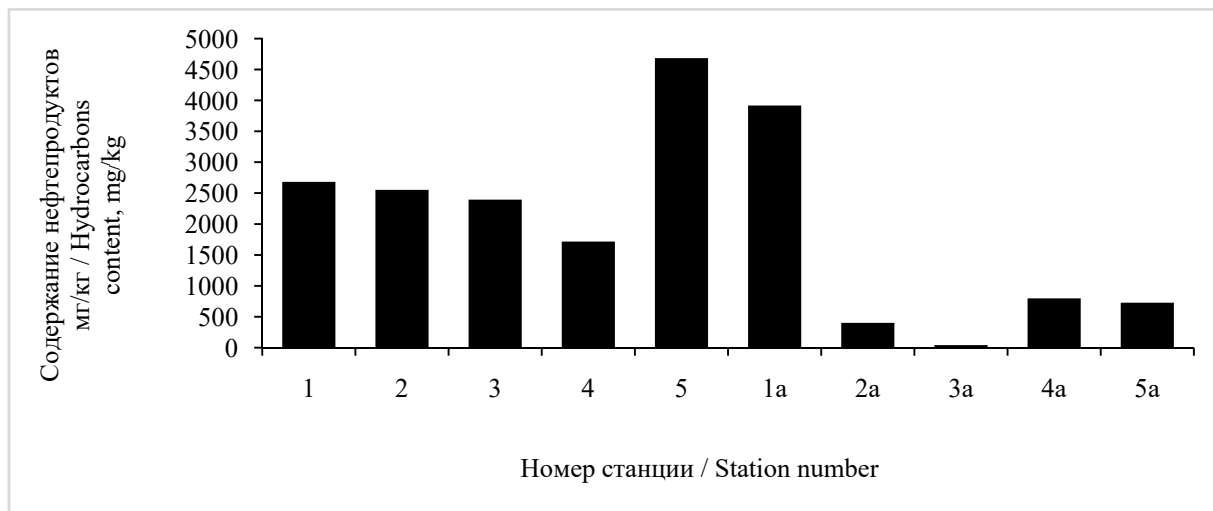


Рис. 2. Содержание нефтепродуктов в дорожной пыли

Fig. 2. The hydrocarbons content in road dust

Диапазон варьирования содержания нефтепродуктов в снеге составлял 0,045–0,265 (среднее 0,15) мг/дм³ (рис.3 / fig.3). Самая высокая концентрация обнаружена в снеге на набережной р. Дон в г. Ростове-на-Дону (ст. 1а), самая низкая – в снеге станции Грушевская (ст. 3). Отметим, что на содержание нефтепродуктов в дожде и снеге не установлены уровни ПДК. В то же время атмосферные осадки

попадают в почвы, поверхностные и грунтовые воды и, следовательно, могут оказать на них негативное воздействие. Поэтому, мы считаем вполне уместным сравнение содержаний нефтепродуктов в снеге со значениями ПДК для поверхностных вод. Содержание нефтепродуктов в отобранных пробах снега оказались выше ПДК в воде водных объектов рыбохозяйственного значения (0,05 мг/дм³). Следовательно,

выпадающие на поверхность почв и водных объектов гидрометеоры на территории Ростовской области мо-

гут способствовать загрязнению компонентов ландшафтов.

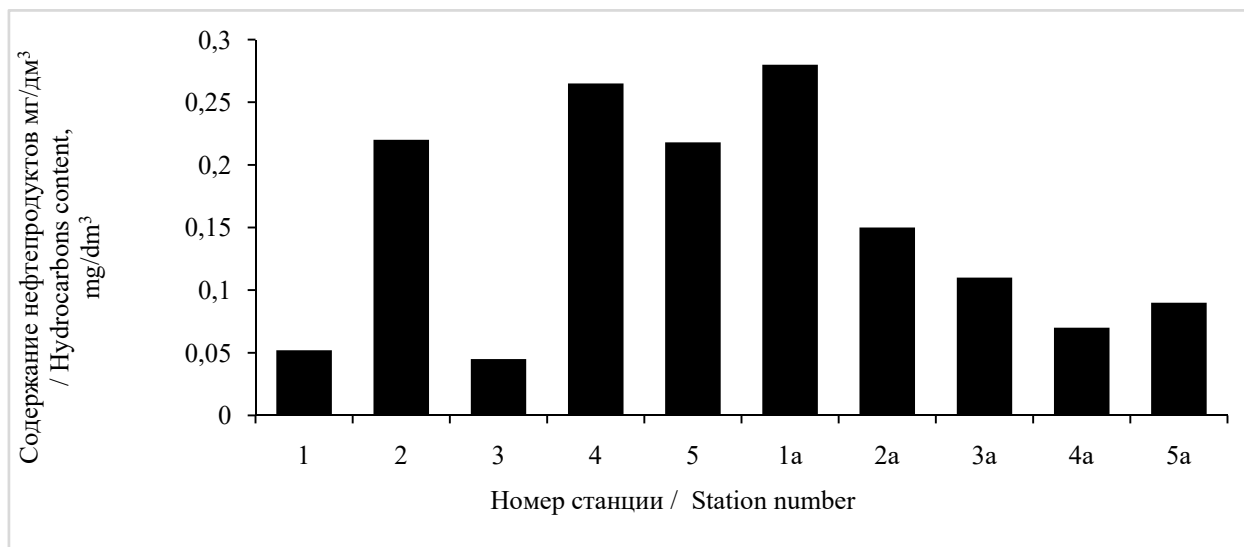


Рис. 3. Содержание нефтепродуктов в снеге

Fig. 3. The hydrocarbons content in snow

Диапазон колебания концентрации нефтепродуктов в поверхностном горизонте почвенного покрова изменялся в пределах 31,1–2390,3 (в среднем 764,9) мг/кг (рис.4 / fig.4), максимальное значение было зафиксировано в почве вблизи дороги, проходящей рядом с парком Островского (ст. 5), а минимальное – в почве х. Береговой (ст. 3а). До настоящего времени ПДК нефти в почве не установлены. На основании нормативного документа [11], содержание нефти в почве в пределах 1 г/кг оценивают как допустимое, 1–2 г/кг – низкое, 2–3 г/кг – среднее, 3–5 г/кг – высокое и более 5 г/кг – очень высокое, хотя обоснование этих критериев отсутствует. Если следовать данным нормативным

показателям, то содержания нефтепродуктов в почве Ростовской области следует оценить как колеблющиеся от допустимого до среднего уровня. Для сравнения отметим, что в ходе исследований на месте разлива сырой нефти в Родионово-Несветайском районе на нефтепроводе «Лисичанск – Тихорецк», проведенных в 1993 г. 40 дней спустя после аварии, наибольший уровень загрязнения почв был выявлен в балке, расположенной ближе всего к месту разрыва нефтепровода. В почвах, отобранных у протекающего по дну балки ручья, содержание сырой нефти изменялось в пределах 43–299 г/кг сухого вещества, быстро снижаясь до фонового уровня на склонах балки [6, 13].

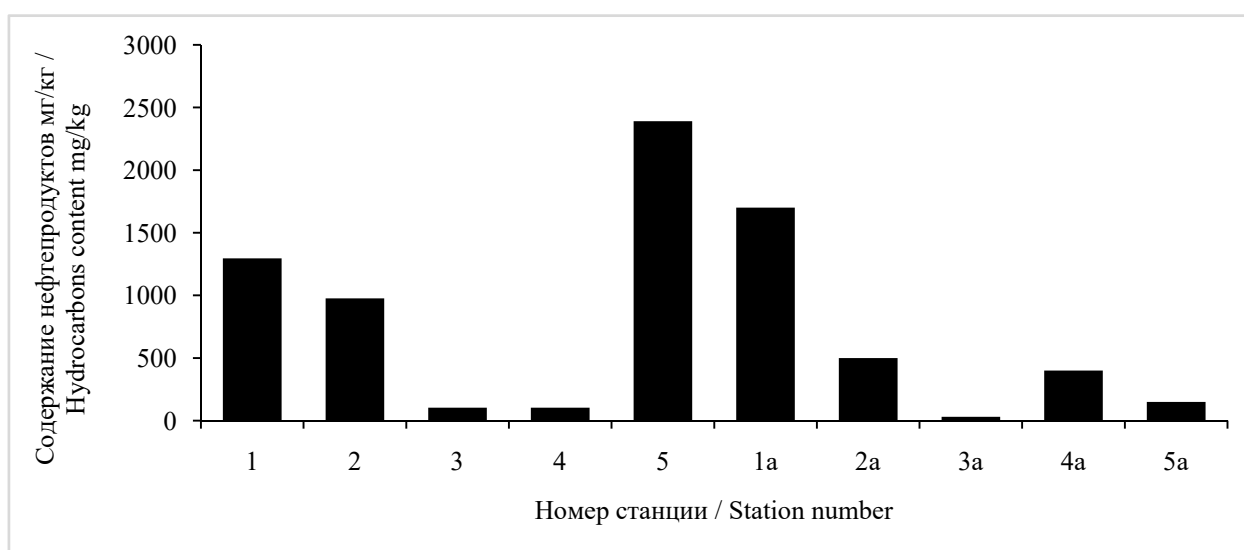


Рис. 4. Содержание нефтепродуктов в почве

Fig. 4. The hydrocarbons content in soil

Сравнение содержания нефтепродуктов в изученных средах позволяют для всего массива данных построить следующий ряд последовательности: дорожная пыль → почва → снег, который сохраняется практически на всех, кроме одной, станциях. Отмечен тренд в симбатном снижении содержания нефтепродуктов в дорожной пыли, почвах и снеге по мегапрофилю в направлении гг. Ростов-на-Дону, Шахты → побережье Таганрогского залива. Не исключено, что это обусловлено различиями в существующей антропогенной нагрузке на педосферу и тропосферу, прежде всего автомобильной, в преимущественно урбанизированных и аграрных приморских районах Ростовской области. Констатировано, что в ходе проведенных исследований по мегапрофилю «с. Маргаритово (побережье Азовского моря) – г. Шахты (Восточный Донбасс)» не было обнаружено катастрофических доз содержания нефтепродуктов, способных оказать на биологическую активность почв Ростовской области сильное ингибирующее воздействие. Тем не менее, учитывая перманентное загрязнение окружающей среды, включая почвы, особенно придорожные, выбросами автотранспорта и энергетических установок необходимо проведение специальных исследований для выяснения, какое воздействие на экологическое состояние региональной педосферы может оказать феномен её хронического загрязнения нефтепродуктами. Нельзя также исключить вероятность загрязнения почв в результате аварий, которые могли бы привести к снижению их биологической активности.

Заключение

Анализ массива данных экспедиционного исследования показал, что, согласно нормативным показателям, содержание нефтепродуктов в почвах Ростовской области следует оценить как изменяющееся от допустимого до среднего содержания. Сделан вывод, что дорожная пыль и снег являются одними из доминирующих источников загрязнения почв нефтепродуктами. Построен следующий ряд последовательности: дорожная пыль → почва → снег, который сохраняется практически на всех, кроме одной, станциях. Отмечен тренд в симбатном снижении содержания нефтепродуктов в дорожной пыли, почвах и снеге по мегапрофилю в направлении гг. Ростов-на-Дону, Шахты → побережье Таганрогского залива. Не исключено, что это обусловлено различиями в существующей антропогенной нагрузке на педосферу и тропосферу, прежде всего автомобильной, в преимущественно урбанизированных и аграрных приморских районах Ростовской области.

Сведения об авторском вкладе

Ю.А. Федоров – научное руководство исследованием; формулировка научных гипотез, проверяемых посредством экспериментальных исследований (25%).

А.Н. Кузнецов – научное руководство исследованием (25%).

Л.Ю. Дмитрик – интерпретация полученных результатов, участие в экспедиционных исследованиях (20%).

Е.В. Кузнецова – интерпретация полученных результатов (15%).

О.Ю. Бэллинджер – интерпретация полученных результатов (15%).

Contribution of the authors

Yu.A. Fedorov – scientific management of the research; formulation of scientific hypotheses, tested through experimental studies (25%).

A.N. Kuznetsov – scientific management of the research (25%).

L.Yu. Dmitrik – interpretation of the obtained results, participation in expeditionary research (20%).

E.V. Kuznetsova – interpretation of the obtained results (15%).

O.Yu. Ballinger – interpretation of the obtained results (15%).

Список источников

1. *Вассоевич Н.Б.* Основные закономерности, характеризующие органическое вещество современных и ископаемых осадков // *Природа органического вещества современных и ископаемых осадков.* М.: Наука, 1973. С. 11–59.

2. ГОСТ 17.1.4.01-80. Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Общие требования к методам определения нефтепродуктов в природных и сточных водах. М.: Стандартинформ, 2010. 4 с.

3. ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М.: Стандартинформ, 2008. 8 с.

4. *Казеев К.Ш.* Эколого-географические закономерности биологических свойств почв Юга России: автореф. дис. ... докт. геогр. наук: 25.00.23. Ростов-на-Дону, 2004. 51 с.

5. *Кузнецов А.Н., Федоров Ю.А.* Нефтяное загрязнение в водных экосистемах. Закономерности естественной трансформации. Saarbrucken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2011. 187 с.

6. *Кузнецов А.Н., Федоров Ю.А.* Нефтяные компоненты в устьевой области р. Дон и Азовском море (результаты многолетних исследований) // *Водные ресурсы.* 2014. Т. 41. № 1. С. 49–59. <https://doi.org/10.1134/S0097807814010072>

7. Методика измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природных, питьевых, сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02» (М 01-05-2012). М, 2012. 25 с.

8. Методика измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв и грунтов флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02» (М 03-03-2012). М. 2012. 25 с.

9. *Околелова А.А., Капля В.Н., Лапченков А.Г.* Оценка содержания нефтепродуктов в почвах // *Научные ведомости. Серия: Естественные науки.* 2019. Т. 43. № 1. С. 76–86.

10. Порядок определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами. М.: Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации, 1993. 7 с.

11. *Федоров Ю.А., Страдомская А.Г., Кузнецов А.Н.* Закономерности трансформации нефтяного загрязнения в водотоках по данным многолетних наблюдений // *Водные ресурсы.* 2006. Т. 33. № 3. С. 327–337. <https://doi.org/10.1134/S0097807806030079>

12. Федоров Ю.А. Стабильные изотопы и эволюция гидросферы. М.: МО РФ Центр «Истина», 1999. 367 с.

13. Хант Дж. Геохимия и геология нефти и газа. М.: Мир, 1982. 704 с.

14. Чукпарова А.У. Оценка состояния и биологическая рекультивация нефтезагрязненных почв // Всероссийский журнал научных публикаций. 2011. № 4. С. 24–25.

15. Buzmakov S.A., Egorova D.O., Gatina E.L. Effects of crude oil contamination on soils of the Ural region // Journal of Soils and Sediments. 2018. pp. 38–48. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2025-0>

16. Buzmakov S.A., Khotyanovskaya Y.V. Degradation and pollution of lands under the influence of oil resources exploitation// Applied Geochemistry, Volume 113, February 2020, 104443. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104443>

References

1. Vassojevich, N., 1973. Osnovny'e zakonomernosti, karakterizuyushhie organicheskoe veshhestvo sovremennyh i iskopaemyh osadkov [Basic laws characterizing the organic matter of modern and fossil sediments]. In: *Priroda organicheskogo veshhestva sovremenny'x i iskopaemy'x osadkov* [Nature of the organic matter of modern and fossil sediments]. Moscow.: Nauka, pp. 11-59. (In Russian)

2. GOST 17.1.4.01-80. Oхрана природы` (SSOP). Gidrosfera. Obshhie trebovaniya k metodam opredeleniya nefteproduktov v prirodnyh i stochnyh vodah [Nature protection. Hydrosphere. General requirements for methods of determination petroleum products content in natural and waste waters]. Moscow: Standartinform, 2010. 4 p. (In Russian)

3. GOST 17.4.4.02-84. Oхрана природы`. Pochvy`. Metody` otbora i podgotovki prob dlya himicheskogo, bakteriologicheskogo, gel'mintologicheskogo analiza [Nature protection. Soils. Methods for sampling and preparation of soils for chemical, bacteriological, helmintological analysis]. Moscow: Standartinform, 2008. 8 p. (In Russian)

4. Kazeev, K., 2004. *E'kologo-geograficheskie zakonomernosti biologicheskix svoystv pochv Yuga Rossii* [Ecological and geographical patterns of biological properties of soils in the South of Russia]. Doctor's Dissertation Abstract of Sciences in Geography. Rostov-on-Don, 51 p.

5. Kuznetsov, A. and Fedorov, Yu., 2011. *Neftyanoe zagryaznenie v vodny'x e'kositemax. Zakonomernosti estestvennoj transformacii* [Oil pollution in aquatic ecosystems. Patterns of natural transformation]. Saarbrucken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 187 p. (In Russian)

6. Kuznetsov, A., and Fedorov, Yu., 2014. Oil components in the estuarine region of the Don and the Sea of Azov (results of long-term research). *Water resources*,

41(1), pp. 49–59. <https://doi.org/10.1134/S0097807814010072> (In Russian)

7. Metodika izmerenij massovoj koncentracii nefteproduktov v probax prirodny'x, pit'evy'x, stochny'x vod fluorimetricheskim metodom na analizatore zhidkosti «Flyuorat-02» (M 01-05-2012) [The method of measuring the mass concentration of oil products in samples of natural, drinking, wastewater by the fluorimetric method on the liquid analyzer «Fluorat-02» (M 01-05-2012)]. Moscow, 2012. 25 p. (In Russian)

8. Metodika izmerenij massovoj doli nefteproduktov v probax pochv i gruntov fluorimetricheskim metodom na analizatore zhidkosti «Flyuorat-02» (M 03-03-2012) [The method of measuring the mass fraction of oil products in soil and soil samples by the fluorimetric method on the liquid analyzer «Fluorat-02» (M 03-03-2012)]. Moscow, 2012. 25 p. (In Russian)

9. Okolelova, A., Kaplya, V. and Lapchenko, A., 2019. Ocenka sodержaniya nefteproduktov v pochvax [Assessment of the content of oil products in soils] *Nauchny'e vedomosti. Seriya: Estestvenny'e nauki*. 43(1), pp. 76-86. (In Russian)

10. Poryadok opredeleniya razmerov usherba ot zagryazneniya zemel` ximicheskimi veshhestvami [Procedure for determining the amount of damage caused by land pollution with chemicals]. Moscow: Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of the Russian Federation, 1993. 7 p. (In Russian)

11. Fedorov, Yu., Stradomskaya, A. and Kuznetsov, A., 2006. Regularities of transformation of oil pollution in watercourses according to long-term observations. *Water resources*, 33(3). pp. 327–337. <https://doi.org/10.1134/S0097807806030079> (In Russian)

12. Fedorov, Yu., 1999. *Stabil'ny'e izotopy` i e'voluciya gidrosfery`* [Stable isotopes and the evolution of the hydrosphere]. Moscow, MO RF Center «Истина», 367 p. (In Russian)

13. Hunt, J., 1982. *Geohimiya i geologiya nefi i gaza* [Geochemistry and geology of oil and gas]. Moscow: Mir publ., 704 p. (In Russian)

14. Chukparova, A., 2011. Ocenka sostoyaniya i biologicheskaya rekul'tivaciya neftezagryaznenny'x pochv [Assessment of the state and biological recultivation of oil-contaminated soils]. *Vserossijskij zhurnal nauchny'x publikacij*, (4), pp. 24–25. (In Russian)

15. Buzmakov S., Egorova D., Gatina E. Effects of crude oil contamination on soils of the Ural region // Journal of Soils and Sediments. 2018. pp 38–48. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2025-0>

16. Buzmakov, S., Khotyanovskaya, Y. Degradation and pollution of lands under the influence of oil resources exploitation// Applied Geochemistry, Volume 113, February 2020, 104443. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104443>

Статья поступила в редакцию 16.09.2022; одобрена после рецензирования 26.09.2022; принята к публикации 03.10.2022.

The article was submitted 16.09.2022; approved after reviewing 26.09.2022; accepted for publication 03.10.2022.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Бузмаков С.А., Переведенцева Л.Г., Бердинских С.Ю., Боталов В.С., Романов А.В., Гатина Е.Л., Шестаков И.Е., Зайцев А.Г.....	6
Хаустов А.П., Редина М.М.....	16
Емельянов М.А., Клочихина О.С.....	39
Беляева П.Г.....	53
Федоров Ю.А., Кузнецов А.Н., Дмитрик Л.Ю., Кузнецова Е.В., Бэллинджер О.Ю.....	61

Научное издание

АНТРОПОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Том 8, № 2
2022

Компьютерная верстка: Е.А. Мехоношина
Макет обложки: П.Ю. Санников

Подписано в печать 05.12.2022. Дата выхода: 15.12.2022
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 7,91. Тираж 100 экз. Заказ 174

Редакция научного журнала «Антропогенная трансформация природной среды»
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15. ПГНИУ. Географический факультет
Тел. (342) 239-64-87

Издательский центр
Пермского государственного
национального исследовательского университета.
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15
Тел. (342) 239-66-36

Распространяется бесплатно