

ОСОБЕННОСТИ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ АВТОТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА БЕЛОРУССИИ

Поступила 28.01.2026

Принята к публикации 5.03.2026

Опубликована 11.06.2026

КОРОЛЁВ В.А.

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д. г.-м. н., профессор, г. Москва, Россия

ГАЛКИН А.Н.

Профессор кафедры экологии и географии Витебского государственного университета имени П.М. Машерова, д. г.-м. н., профессор, г. Витебск, Белоруссия
galkin-alexandr@yandex.by

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена изучению эколого-геологических систем (ЭГС), связанных с автотранспортным комплексом Белоруссии. Эти системы, играющие ключевую роль в транспортной инфраструктуре и занимающие значительные территории, до сих пор остаются практически неисследованными, а имеющиеся сведения об их абиотических и биотических составляющих носят фрагментарный характер. Используя ранее предложенную авторами классификацию природных и техногенных ЭГС территории Белоруссии и систематику ЭГС транспортно-коммуникационных комплексов, авторы предприняли попытку дать комплексную характеристику эколого-геологических систем автотранспортного комплекса страны. В работе детально рассматриваются особенности их абиотических (литотопа, гидротоп, атмотоп), биокосных (эдафотоп) и биотических (микробеценоз, фитоценоз, зооценоз, социума) компонентов. Полученные результаты и выявленные закономерности могут служить основой для понимания особенностей аналогичных ЭГС в России и являются важными для проведения инженерно-экологических исследований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

эколого-геологическая система (ЭГС); автотранспортный комплекс; технолитотоп; техноэдафотоп; техномикробеценоз; технофитоценоз; технозооценоз; Белоруссия.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Королёв В.А., Галкин А.Н., 2026. Особенности эколого-геологических систем автотранспортного комплекса Белоруссии // Геоинфо. 2026. Т. 8. № 1. С. 10–38. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-1-10-38.

FEATURES OF ECOLOGICAL-GEOLOGICAL SYSTEMS OF THE MOTOR TRANSPORT COMPLEX OF BELARUS

Received: 28.01.2026

Accepted for publication 5.03.2026

Published 11.06.2026

KOROLEV V.A.

DSc (Geology and Mineralogy), professor at the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

GALKIN A.N.

DSc, professor at the Department of Ecology and Geography, Masharov Vitebsk State University, Vitebsk, Belarus
galkin-alexandr@yandex.by

ABSTRACT

This article examines the ecological-geological systems (EGS) associated with the Belarusian motor transport sector. These systems, which play a key role in transport infrastructure and occupy significant territories, remain virtually unexplored, and existing information on their abiotic and biotic components is fragmentary.

The authors attempt to provide a comprehensive description of the EGS in the motor transport sector of the country using the classification of natural and man-made EGS in Belarus and the taxonomy of EGS in transport and communications systems that were previously proposed by them. The paper examines in detail the characteristics of their abiotic (lithotope, hydrotople, atmotope), bioinert (edaphotope), and biotic (microbocoenosis, phytocoenosis, zoocoenosis, and socium) components.

The obtained results and identified patterns may serve as a basis for understanding the features of similar ecological-geological systems in Russia, and they are important for conducting engineering-ecological studies.

KEYWORDS:

ecological-geological system (EGS); motor transport complex; technolithotope; technoedaphotope; technomicrobiocenosis; technophytocenosis; technozoocenosis; Belarus.

FOR CITATION:

Korolev V.A., Galkin A.N. Osobennosti ekologo-geologicheskikh sistem avtotransportnogo kompleksa Belorussii [Features of ecological-geological systems of the motor transport complex of Belarus] // *GeoInfo*. 2026. T. 8. № 1. S. 10–38. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-1-10-38 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В экологической геологии и геоэкологии центральное место занимает эколого-геологическая система (ЭГС), чья структура и классификация, предложенные В.Т. Трофимовым [1], являются основополагающими. На территории Белоруссии выделяются различные типы ЭГС – как природные, так и техногенные (включая техноприродные, природно-техногенные и искусственные, или антропогенно созданные). Природные и некоторые техногенные ЭГС изучены достаточно хорошо: определена их систематика и описаны абиотические (литотоп, гидротоп), биокосные (эдафотоп) и биотические (микробоценоз, фитоценоз, зооценоз) компоненты [2–10]. Однако искусственные ЭГС на территории республики исследованы пока недостаточно.

Как ранее уже отмечалось [2, 3], в Белоруссии выделено шесть классов эколого-геологических систем, сформированных

под влиянием деятельности человека: горнопромышленные, промышленные, оборонно-промышленные, селитебные, транспортно-коммуникационные и агрономические ЭГС. Особое место среди них занимают ЭГС транспортно-коммуникационных комплексов. Их стабильное функционирование является ключевым фактором не только для обеспечения мобильности населения и доступа к услугам, но и для бесперебойной работы всех отраслей экономики. С точки зрения экологии это является основополагающим условием для поддержания жизнеспособности экосистем. Более того, надежность и безопасность транспортной инфраструктуры напрямую влияют на национальную безопасность государства, что также имеет экологические последствия.

Согласно ранее опубликованной статье [11], под *эколого-геологической системой транспортно-коммуникационного комплекса* понимается *определенный участок литосферы, где происходит взаимодействие геологической среды и живых*



Рис. 1. Структура ЭГС транспортно-коммуникационных комплексов [11]

организмов (включая человека), обеспечиваемое транспортно-информационными потоками вещества, энергии и информации. Эта система является частью более широкой экосистемы и рассматривается как объект исследования экологической геологии, определяющий, по существу, все экологические функции литосферы – ресурсную, геохимическую, геофизическую и геодинамическую.

Эколого-геологические системы транспортно-коммуникационных комплексов по структуре схожи с другими искусственными ЭГС (рис. 1). Они включают в себя как абиотические (литотоп, гидротоп, атмотоп, технические сооружения) и биокосные (эдафотоп), так и биотические (микробоценоз, фитоценоз, зооценоз, социум) компоненты, но техногенно измененные или антропогенно созданные за счет социума и построенных им технических транспортно-коммуникационных сооружений.

Ранее нами была предложена классификация эколого-геологических систем транспортно-коммуникационных комплексов [11], согласно которой в рассматриваемом классе ЭГС выделяется восемь типов: ЭГС автотранспортных, железнодорожных, транспортных терминалов, воднотранспорт-

ных, авиационных, транспортно-космических, коммуникационно-энергетических и промышленно-продуктопроводных комплексов.

Примечательно, что Белоруссия располагает практически всеми вышеперечисленными типами ЭГС (за исключением транспортно-космических), что подчеркивает стратегическую роль республики как важнейшего транспортного узла, соединяющего Западную Европу, Россию и Азию. Ведущее место среди указанных типов эколого-геологических систем в стране занимают ЭГС автотранспортного комплекса. Это объясняется географическим положением Белоруссии как внутриконтинентального государства, где автомобильный транспорт является наиболее удобным и эффективным средством для перемещения людей и грузов как внутри страны, так и на международном уровне. Важность автомобильных дорог подтверждается наличием в стране пяти международных трасс категории Е, имеющих общую длину 1841 км (рис. 2). Кроме того, через Белоруссию проходят трансъевропейские транспортные коридоры II (Берлин – Варшава – Минск – Москва – Нижний Новгород) и IX (Хельсинки – Александрополис) с ответвлением IXB (Ка-



Рис. 2. Международные автомобильные трассы и трансевропейские транспортные коридоры, пересекающие Белоруссию [13]

лининград/Клайпеда – Киев), суммарная протяженность которых составляет 1534 км. В частности, трасса М-1/Е-30 (Брест – Минск – граница РФ), являющаяся частью коридора II, имеет протяженность 610 км на территории республики и характеризуется высокой интенсивностью движения (8500–10000 автомобилей в сутки на отдельных участках). Трасса М-8/Е-95 (граница РФ – Гомель – граница Украины) протяженностью 456 км проходит с севера на юг и входит в состав коридора IX, связывающего Финляндию, Россию, Беларусь, Украину, Молдову, Румынию, Болгарию и Грецию. Ответвление IXВ (Гомель – Минск – Вильнюс – Клайпеда – Калининград) длиной 468 км обеспечивает доступ к портам Калининграда для грузоотправителей из восточных регионов Украины и центральной России [12].

Автотранспортное хозяйство Белоруссии – это сложная технико-экономическая структура. Она включает в себя не только сами автомобильные дороги, но и всю производственную базу организаций, ответственных за их жизненный цикл: от проектирования, строительства и реконструкции до содержания, ремонта, диагностики, а также производства дорожной техники, добычи и переработки нерудных материалов.

Взаимодействуя с окружающей природной средой, эта система формирует ЭГС автотранспортного комплекса – совокупность взаимосвязанных природных и созданных человеком элементов, чья работа направлена на обеспечение непрерывного и безопасного движения автотранспорта, а также на поддержание устойчивости геологической среды в зоне их влияния.

Эколого-геологические характеристики, структура и специфика этих ЭГС существенно отличаются от таковых для других подобных систем и до сих пор остаются малоизученными. В связи с этим на основе ранее разработанной нами классификации эколого-геологических систем территории Белоруссии [2, 3], а также систематики ЭГС транспортно-коммуникационных комплексов [11] в данной статье предпринята попытка представить общее описание рассматриваемых эколого-геологических систем, а также выявить и охарактеризовать особенности их абиотических (техническая составляющая, литотоп, гидротоп, атмотоп), биокосных (эдафотоп) и биотических (микробоценоз, фитоценоз, зооценоз, социум) компонентов. Это и стало основной целью исследования и его задачами.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КОМПОНЕНТЫ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ ЭГС АВТОТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

Автомобильный транспорт и вся его инфраструктура относятся к основным источникам воздействий на окружающую природную среду. Это воздействие многогранно и проявляется по большей части в химическом, физическом и механическом загрязнении, оказывая существенное влияние на состояние экосистем и здоровье человека. Прежде всего автотранспорт является значительным источником загрязнения атмосферного воздуха. На его долю приходится 89% общего объема вредных примесей, поступающих в атмосферу от всех видов транспорта [14], и эта доля продолжает расти, несмотря на технологические усовершенствования двигателей.

Наибольшая доля химического загрязнения приходится на отработавшие газы (ОГ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Они содержат около двухсот веществ, большинство из которых токсично. К токсичным компонентам относятся оксид углерода, углеводороды, оксиды азота и серы, альдегиды, сажа, бензо(а)пирен и соединения свинца. Причиной образования оксида углерода является неполное сгорание топлива. При этом следует отметить, что химический состав ОГ зависит от вида и качества топлива, технологии производства, способа сжигания в двигателе и его технического состояния.

Кроме отработавших газов источниками загрязнения атмосферного воздуха являются картерные газы, а также испарение топлива из топливной системы. Согласно данным, приведенным в книге [15], легковой автомобиль при среднегодовом пробеге 15 тыс. км сжигает 4,36 т кислорода и выбрасывает 3,25 т углекислого газа, 0,8 т оксида углерода, 0,2 т углеводородов, 0,04 т оксида азота. В отличие от промышленных предприятий, выброс которых концентрируется в определенной зоне, автотранспорт является передвижным источником загрязнения и рассеивает выбросы непосредственно в приземном слое атмосферы.

Попадая в атмосферу, компоненты ОГ ДВС, с одной стороны, смешиваются с имеющимися в воздухе загрязнителями, а с другой – претерпевают ряд сложных превращений, приводящих к образованию новых соединений. Одновременно идут процессы разбавления и удаления загрязнителей из атмосферного воздуха путем мокрого и сухого осаждения на поверхность земли. В связи с огромным многообразием химических превращений загрязнителей в атмосферном воздухе их состав чрезвычайно динамичен.

При движении автомобилей происходит истирание дорожных покрытий и автомобильных шин, продукты износа

которых смешиваются с твердыми частицами отработавших газов. К этому добавляется грязь, занесенная на проезжую часть с прилегающего к дороге почвенного слоя. В результате образуется пыль, в сухую погоду поднимающаяся над дорогой в воздух. Она переносится ветром на расстояния от нескольких до сотен километров. Химический состав и объем образующейся пыли напрямую зависят от типа дорожного покрытия. Наибольшее количество пыли образуется на грунтовых и гравийных дорогах. Пыль с гравийных дорог преимущественно состоит из диоксида кремния. На грунтовых дорогах до 90% пыли составляют кварцевые частицы, а остальная доля приходится на оксиды алюминия, железа, кальция и другие элементы. Валовый выброс пыли с автомобильных дорог без капитального покрытия (грунтовых, гравийных, щебеночных) превышает 56 тыс. т. На дорогах с асфальтобетонным покрытием в состав пыли дополнительно входят продукты износа битумсодержащих вяжущих материалов, а также частицы краски или пластмассы от дорожной разметки [14].

Сточные воды автомобильных дорог и других непроницаемых поверхностей являются одним из главных источников загрязнения поверхностных и подземных вод. Дождевые и талые воды, стекающие с дорог, несут с собой бензин, моторное масло, тяжелые металлы и другие вредные вещества.

Шум, производимый автомобилями, – одна из самых больших проблем, связанных с дорожным движением. Этот фактор доминирует в городской акустической среде, формируя от 60 до 80% общего шумового фона. Источники шума многообразны – от работы двигателя и трансмиссии до элементов подвески и аэродинамического сопротивления кузова. Несмотря на регулирование уровня шума для новых транспортных средств, их эксплуатация и естественный износ приводят к значительному увеличению шумовой нагрузки, что пагубно сказывается на комфортности проживания и здоровье населения.

Особую экологическую опасность представляют вибрации, возникающие при передвижении тяжелых грузовых автомобилей. Вибрационное воздействие транспорта к настоящему времени изучено недостаточно, однако известно, что такого рода воздействия негативно отражаются на целостности инженерных сооружений (включая мосты, тоннели и дамбы), могут провоцировать некоторые опасные природные явления (оползни, в том числе обвалы), а также ускоряют износ зданий и сооружений, исторических памятников и культурных объектов [14].

Движение автотранспорта и сами автомобильные дороги приводят к значительным изменениям в природных экосистемах. Например, пыль, образующаяся в результате работы транспорта, содержит вредные вещества из выхлопных газов, некоторые из которых токсичны для растительности. Эти за-

Таблица 1. Источники и состав вредных веществ, выделяющихся при работе автотранспортных предприятий эксплуатационного и ремонтного профиля [17]

Название зоны, участка, отделения	Выделяющиеся вредные вещества и/или отходы
Участок мойки автомобилей	Пыль, щелочи, синтетические поверхностно-активные вещества, нефтепродукты, растворимые кислоты, фенолы
Зона технического обслуживания, участок диагностирования	Оксиды углерода, углеводороды, оксиды азота, масляный туман, сажа, пыль
Слесарно-механическое отделение	Пыль абразивная, металлическая, стружка, масляный туман, эмульсии
Электротехническое отделение	Абразивная и асбестовая пыль, канифоль, пары кислот
Аккумуляторный участок	Промывочные растворы, пары кислот, электролиты, шламы, щелочные аэрозоли
Отделение топливной аппаратуры	Бензин, керосин, дизельное топливо, ацетон, бензол, ветошь
Медницко-жестяницкое отделение	Пары кислот, наждачная и металлическая пыль, такие отходы, как лом черных и цветных металлов, отработанный флюс, шлаки и шламы пайки, обрезки зачистных кругов и др.
Сварочное отделение	Минеральная пыль, сварочный аэрозоль, оксиды марганца, азота, хрома, хлористый водород (хлорид водорода), фториды
Арматурное отделение	Пыль, сварочный аэрозоль, металлические, древесные и пластмассовые отходы, в том числе древесная и металлическая стружка
Участок шиномонтажа и ремонта шин	Минеральная и резиновая пыль, сернистый ангидрид (диоксид серы), пары бензина
Участок лакокрасочных покрытий	Минеральная и органическая пыль, пары растворителей, аэрозоли красок
Участок обкатки двигателей	Оксиды углерода, углеводороды, оксиды азота, сажа, сернистый ангидрид (диоксид серы)
Стоянки личного и технологического автотранспорта	Оксиды углерода, углеводороды, оксиды азота, сажа, сернистый ангидрид (диоксид серы), пыль
Освещение помещений	Ртутьсодержащие лампы
Жизнедеятельность персонала	Твердые бытовые отходы

грязнители оседают на листьях, препятствуя фотосинтезу, проникают в ткани растений, вызывая их повреждение и приводя к снижению продуктивности и изменению структуры растительности даже на значительном удалении от дорог [16].

Применяемые противогололедные реагенты (хлориды натрия, кальция, магния и др.) могут быть токсичны для чувствительных растений и животных. Песок, смываемый поверхностным стоком с автомобильных дорог, способен трансформировать среду обитания в водотоках, создавая неблагоприятные условия для населяющих их организмов.

Весьма многогранным является влияние на окружающую среду процесса строительства автомобильных дорог. Каждая

дорога – это протяженная полоса земли, отторгнутая у природы и преобразованная для нужд транспорта¹, что делает ее инородным телом в естественном ландшафте и нарушает экологический баланс.

Строительство автомобильных трасс способно кардинально изменить ландшафт (включая рельеф, гидрологические особенности) и климат, тем самым нарушая привычные места обитания растительного и животного мира.

Процесс строительства, как правило, начинается с выбора маршрута, который часто требует вырубки лесов, осушения водно-болотных угодий и т.д. К другим технологическим процессам, негативно влияющим на окружающую среду, от-

¹ На строительство 1 км современной автомагистрали требуется до 10–12 га площади. Помимо этого дополнительные площади отводятся для технологических целей – устройства складов хранения строительных материалов, мест стоянок транспортной техники, размещения снятого с дороги грунта, постройки временных сооружений и подъездов и т.д. Особенно большие площади занимают транспортные развязки – от 15 га при пересечении двухполосных дорог до 35 га при пересечении магистралей с шестью полосами движения [14].

носятся: снятие плодородного слоя почвы, интенсивная работа строительной техники, изъятие территорий и фрагментация ландшафта, масштабные земляные работы, формирование дорожного полотна (включая перемещение грунта и укладку различных слоев), производство необходимых стройматериалов (добыча песка, щебня, гравия, изготовление железобетонных конструкций и др.), а также сварочные, монтажные работы и образование большого количества отходов. При этом следует отметить, что вред от эксплуатации дорожно-строительной техники, как правило, является временным и ограничивается сроками выполнения строительных или ремонтных работ.

Предприятия, занимающиеся обслуживанием и ремонтом транспортных средств, а также вспомогательные производства, здания и сооружения хозяйственного назначения (вокзалы, заправочные станции, топливные склады и т.д.), места стоянок автотранспорта и пр. оказывают не менее значительное негативное влияние на компоненты окружающей среды.

Техническое обслуживание и ремонт автотранспортных средств требуют существенных энергетических затрат и сопровождаются большими расходами воды, выбросами загрязняющих веществ в атмосферу и водоемы, а также возникновением отходов, включая токсичные. При многих технологических процессах образуются производственные сточные воды. Например, при мойке автомобилей, очистке узлов и агрегатов в моечных машинах, ремонте аккумуляторных батарей, обработке деталей и т.д. Эти воды содержат жидкие нефтепродукты, остатки моющих средств, дезинфицирующих и противогололедных реагентов, формовочных смесей и различных растворов. В их составе присутствуют такие вещества, как бензол, ацетон, кислоты, щелочи, растворенные металлы (алюминий, бериллий, хром и пр.). Кроме того, из этих источников загрязнения в атмосферу попадают газообразные выбросы, образующиеся при работе вентиляционных систем. В состав выбросов входит большое количество минеральной и органической пыли, а также аэрозоли, в том числе масляный туман. Ремонтные работы сопровождаются загрязнением почвы, накоплением металлических, пластмассовых и резиновых отходов вблизи производственных зон и участков [17]. В таблице 1 перечислены некоторые виды загрязнений, образующихся при производственных процессах на автотранспортных предприятиях эксплуатационного и ремонтного профиля.

Таким образом, строительство автомобильных дорог и их эксплуатация чаще всего оказывают негативное влияние на природные экосистемы и окружающую среду в целом, порой провоцируя необратимые изменения. Масштабы и степень проявления этих последствий будут зависеть не только от характеристик автомобильных дорог и движения автотран-

порта, но и от множества сопутствующих факторов, связанных с организацией дорожной инфраструктуры.

ОСОБЕННОСТИ АБИОТИЧЕСКИХ И БИОКОСНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЭГС АВТОТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА БЕЛОРУССИИ

Особенности технической составляющей ЭГС

Структура эколого-геологических систем автотранспортного комплекса аналогична структуре других техногенно измененных или антропогенно созданных ЭГС (см. рис. 1). Для них характерны как абиотические (технические сооружения, литотоп, гидротоп, атмотоп), так и биокосные (эдафотоп) и биотические (микробоценоз, фитоценоз, зооценоз) компоненты, но подвергнутые техногенному преобразованию или созданные искусственно под влиянием социума и возводимых им технических сооружений.

Техническая составляющая рассматриваемых ЭГС на территории Белоруссии, как и в пределах других промышленно развитых стран, объединяет [18]:

- сеть автомобильных дорог общего пользования;
- автомобильные парки (пассажи́рский и транспортный);
- транспортно-экспедиционные предприятия;
- специализированные предприятия по техническому обслуживанию и ремонту автотранспорта;
- авторемонтные заводы;
- производственные базы дорожных организаций;
- организации дорожного хозяйства, осуществляющие деятельность по проектированию, возведению, реконструкции, эксплуатации и капитальному ремонту автомобильных дорог;
- иные производственные организации, обеспечивающие бесперебойное функционирование дорожной сети;
- предприятия, предоставляющие связанные с дорогами услуги (то есть предприятия придорожного сервиса – автовокзалы, автостанции, автозаправочные станции (АЗС), газозаправочные пункты, гостиницы и др.).

Следует отметить, что автодорожное хозяйство Белоруссии в значительной степени опирается на государственные предприятия, находящиеся в ведении Главного управления автомобильных дорог Министерства транспорта и коммуникаций. Ключевую роль в содержании дорог играют республиканские унитарные предприятия автомобильных дорог (РУП), такие как «Минскавтодор-центр» и его региональные аналоги – «Бреставтодор», «Витебскавтодор», «Гомельавтодор», «Гродноавтодор» и «Могилевавтодор». Их главная задача – поддерживать республиканскую (магистральную) сеть страны

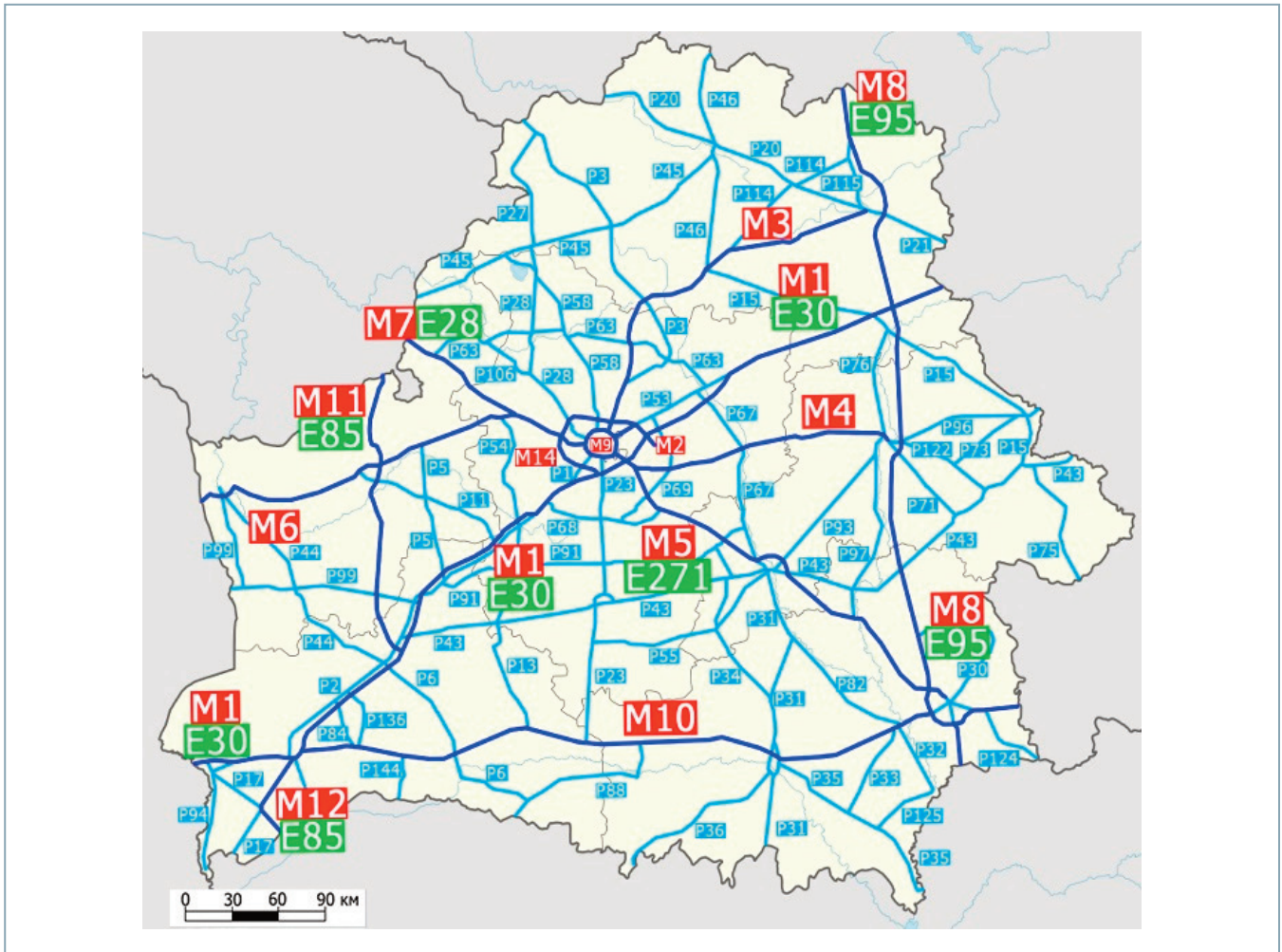


Рис. 3. Схема основных республиканских автомобильных дорог Белоруссии [19]

общего пользования в исправном состоянии. Кроме того, они занимаются изысканиями и проектированием строительства, реконструкции и ремонта дорог, разработкой схем организации дорожного движения и другими смежными задачами. В структуру этих предприятий входят строительные тресты, управления и другие организации, в некоторых из них налажено производство стройматериалов.

В дорожном хозяйстве также действуют специализированные научно-проектные организации («БелдорНИИ», «Белгипродор»), компании, отвечающие за связь и платные дороги («Белдорсвязь», «Белавтострада»), и коммунальные дорожно-строительные или коммунальные проектно-ремонтно-строительные унитарные предприятия по областям, такие как «Брестоблдорстрой», «Витебскоблдорстрой», «Гомельоблдорстрой», «Гроднооблдорстрой», «Минскоблдорстрой» и «Могилевоблдорстрой» с филиалами в районных центрах и рядом производственных организаций (таких как парки спецтехники, асфальтобетонные заводы и др.), основными задачами которых являются содержание, ремонт и развитие (строительство, реконструкция) автомобильных дорог местного уровня, обеспечение безопасного и бесперебойного движения автотранспорта

по обслуживаемой местной сети, поддержание сети дорог в проезжаемом состоянии и выполнение комплекса работ по сохранению их технико-эксплуатационных параметров [18].

Всего в автодорожном хозяйстве Белоруссии производственно-хозяйственную деятельность осуществляют 17 крупных организаций со 198 структурными единицами.

В зависимости от функционального назначения автомобильные дороги общего пользования подразделяются на республиканские и местные.

Республиканские дороги являются основой транспортной инфраструктуры, обеспечивая бесперебойное сообщение между главными населенными пунктами страны и с соседними государствами, а также входят в состав международных автодорожных сетей. Особое значение имеют дороги, соединяющие столицу республики с областными центрами, а также трассы, связывающие между собой областные центры или ведущие к Национальному аэропорту Минск. Эти дороги, обозначаемые как Р и М, находятся под государственным управлением и доступны для всех участников дорожного движения (рис. 3). Среди них выделяют 13 магистральных республиканских дорог (с маркировкой М), семь из которых



Рис. 4. Автомобильная трасса Витебск – Полоцк с асфальтобетонным покрытием (а) и Вторая минская кольцевая автомобильная дорога с цементобетонным покрытием (б) [21]

являются частью общеевропейских транспортных коридоров и служат для связи крупных населенных пунктов с пунктами пропуска на границе. Маркировку Р имеют прочие республиканские дороги.

Местные автомобильные дороги общего пользования имеют маркировку Н². Они охватывают остальные (помимо рассмотренных выше) автомобильные пути, обслуживающие города, поселки, сельские населенные пункты, и могут иметь различное покрытие, в том числе грунтовое [18].

Протяженность сети автомобильных дорог общего пользования в Беларуси по состоянию на 01.01.2025 составляла 86 538 км (в том числе 15 944 км для республиканских дорог, 70 594 км для местных). На этих дорогах функционируют 5204 моста и путепровода общей длиной 186,4 км и более 97,5 тыс. водопропускных труб.

Все республиканские дороги (15 944 км) имеют твердое покрытие, преимущественно асфальтобетонное (15 437 км) и цементобетонное (333 км) (рис. 4). Также встречаются участки с покрытием из черного щебня (67 км), мостовые (6 км) и щебеночно-гравийные (101 км). На республиканских трассах расположено множество мостовых сооружений (в количестве 2254, общей длиной 107,5 км), водопропускных труб (более 23,4 тыс., общей длиной свыше 460 км) и одна паромная переправа с механическим приводом [22].

В зависимости от эксплуатационных параметров, геометрии и условий движения автомобильные дороги в стране подразделяются на следующие технические категории: I (1814 км, включая подкатегории I-а, I-б, I-в); II (1375 км); III (5821 км); IV (6859 км); V (75 км).

Автотранспортная составляющая рассматриваемых ЭГС представлена главным образом парком транспортных средств, который ежегодно увеличивается преимущественно за счет личных автомобилей. Это подтверждается статистическими

данными Национального статистического комитета [20]. Так, с 1997 по 2024 год общее количество автомобилей в Беларуси выросло с 1502,9 тыс. до 3605,3 тыс., то есть примерно на 140%. При этом число личных автомобилей увеличилось с 1116,2 тыс. до 3226,8 тыс. (примерно на 189%), тогда как количество автотранспортных средств, принадлежащих предприятиям, организациям и учреждениям, уменьшилось с 386,7 тыс. до 378,5 тыс. (на 2,1%). Если в 1997 году на каждую тысячу жителей приходилось 148 автомобилей, то в 2024-м этот показатель вырос до 339 [20].

Основной тип транспортных средств, принадлежащих организациям страны, – грузовые автомобили. Они составляют около половины парка. Так, в 2023 году в эксплуатации находилось свыше 240 тыс. грузовиков, значительная часть которых принадлежала крупным государственным ведомствам, включая Минсельхозпрод, Минтранс, Белкоопсоюз, Минпром, Минэнерго и Минстройархитектуры [19].

По состоянию на 01.01.2024 в Беларуси было зарегистрировано около 18,5 тыс. субъектов, лицензированных для международных грузоперевозок. Для белорусских автоперевозчиков ключевым направлением остается Российская Федерация, однако наблюдается устойчивая тенденция к росту объемов перевозок в страны СНГ, Азии и Ближнего Востока, что свидетельствует о диверсификации экспортных логистических маршрутов.

В сегменте общественного автотранспорта доминирующее положение занимают автобусы – многоместные пассажирские автомобили с вместимостью от 10 человек помимо водителя. Для эксплуатации в городах и пригородах используются преимущественно низкопольные городские автобусы, а для междугородных и международных рейсовых и туристических перевозок – междугородные и туристические лайнеры. Туристические автобусы в связи с повышением их комфортности

² Также выделяют дороги необщего пользования (ведомственные, технологические, служебные, патрульные и др.). Они не относятся к местным дорогам и не имеют маркировки Н. Такие дороги могут находиться в государственной или частной собственности [18] (*прим. ред.*).

в конце XX века вполне успешно конкурируют в перевозках туристов с железнодорожным транспортом.

На начало 2024 года автобусная маршрутная сеть республики охватывала значительное количество регулярных маршрутов (6190). Структура этой сети демонстрирует приоритет пригородного сообщения (3804 маршрута), за которым следует городское (1959 маршрутов, включая 47 электробусных), межгородское (385 маршрутов) и международное (42 маршрута). Такая конфигурация отражает потребности населения в ежедневных перемещениях, а также развитие дальних и трансграничных пассажирских перевозок.

Особое значение имеют предприятия, обеспечивающие бесперебойную работу дорожной сети и предоставление связанных с ней услуг. В настоящее время республиканские дороги Белоруссии обслуживаются 414 автозаправочными станциями (рис. 5), 159 газозаправочными пунктами, 72 гостиницами, 45 автомойками, 101 охраняемой стоянкой, 436 торговыми предприятиями, 586 пунктами общественного питания и 74 пунктами технического обслуживания.

Отметим, что успешная работа автомобильного транспорта страны требует хороших дорог. Концепцией развития транспортного комплекса Белоруссии до 2030 года предусмотрено создание подсистемы интеллектуальных транспортных систем и стандартов, которые обеспечат срок службы автомобильных дорог длительностью не менее 30 лет, а также применение неразрезных монолитных конструкций при строительстве и реконструкции мостов, которое обеспечит срок их службы до капитального ремонта длительностью не менее 50 лет [19].

Особенности технолитотопа

Под технолитотопом ЭГС автотранспортного комплекса Белоруссии подразумеваются грунты различного происхождения, служащие либо основанием или вмещающей средой сооружений, либо материалом для строительства. Сюда входят как природные образования – скальные и дисперсные грунты различного генезиса (магматические, метаморфические и осадочные), так и грунты, созданные человеком. Последние, называемые техногенными, включают в себя как естественные грунты, подвергшиеся изменениям и перемещению в результате производственной и хозяйственной деятельности, так и антропогенные образования, которые представляют собой твердые отходы жизнедеятельности населения, характеризующиеся коренными изменениями состава, структуры и текстуры природного минерального и органического сырья.

По степени техногенного воздействия на литосферу эколого-геологические системы автотранспортного комплекса часто сравнимы с ЭГС промышленных и горнопромышленных комплексов. Это проявляется в изменениях структуры, состава



Рис. 5. Автозаправочная станция на трассе М-3 в Логойском районе Минской области [19]

и свойств грунтов, форм рельефа и гидрогеологических условий. Строительство автомобильных дорог неизбежно приводит к трансформации природного рельефа, требуя создания насыпей и выемок, что существенно влияет на геологическую составляющую этих ЭГС.

Ключевым элементом дорожной конструкции является земляное полотно – геотехническая конструкция, выполняемая в виде грунтовых насыпей, выемок или полунасыпей-полувыемок, служащая основанием для дорожной одежды, а также для размещения технических средств организации дорожного движения и обустройства автомобильной дороги [23]. Как грунтовое сооружение земляное полотно обладает рядом важных характеристик, таких как прочность, устойчивость, ремонтпригодность, надежность и экономичность, которые напрямую зависят от свойств применяемых грунтов.

От прочности земляного полотна зависит срок службы дорожной одежды и, как следствие, автомобильной дороги при сохранении транспортно-эксплуатационных качеств. Прочность земляного полотна достигается правильным выбором конструкции, устройством надежного водоотвода и его содержанием, своевременным устранением повреждений дорожной одежды в процессе эксплуатации автомобильной дороги. Однако прочность и устойчивость земляного полотна в значительной степени зависят от правильного производства земляных работ (рационального размещения в теле насыпи грунтов, различных по своим физико-механическим свойствам; достижения необходимой плотности при условии оптимальной влажности грунтов и т.д.). Для сооружения земляного полотна обычно используются местные или привозные грунты, обладающие различными физическими и физико-механическими характеристиками [23]. Лучше всего подходят щебенистые, галечные, гравийные, крупно- и среднезернистые песчаные грунты, которые обладают высокой несущей способностью, хорошо пропускают воду (являются дренирующими) и не изменяют своих свойств при замерзании.



Рис. 6. Реконструкция республиканской автомобильной дороги Р23 Минск – Микашевичи с применением геосинтетических материалов [25]

Грунтовый массив, соприкасающийся с дорогой, в той или иной степени испытывает периодические воздействия от подвижной нагрузки, отличающиеся динамическим характером. При недостаточной устойчивости грунтового массива могут происходить соответствующие деформации. В этом случае обычной практикой служит улучшение (укрепление) грунтов основания сооружения. Например, еще в 1960-х – начале 1970-х годов при строительстве автомобильных дорог были изучены особенности укрепления полесских мелкозернистых песков и других наиболее характерных для Белоруссии грунтов. Исследования того времени доказали возможность использования в качестве оснований автодорог слабых грунтов (кроме текучих) независимо от вида покрытия, нагрузок и интенсивности движения [24].

Улучшенные основания получили широкое распространение в республике в первой половине 1980-х годов. Исследовались возможности укрепления гравийно-песчаных материалов известью, однако более эффективным оказалось использование золы-уноса ТЭЦ. Для укрепления верхней части земляного полотна и слоев дорожной одежды стали применять гидrofобизированные грунты, обработанные водными растворами поверхностно-активных веществ (ПАВ). Также была разработана технология устройства оснований из доломитового щебня. В 2000-е годы для регулирования водно-теплового режима конструкции дорожного полотна и укрепления откосов земляных сооружений стали использовать геосинтетические материалы в качестве защитной прослойки и обратного фильтра (рис. 6). В этих целях нашел широкое применение и геотекстиль с семенами трав.

Определенными отличиями характеризуются литотопы местных грунтовых дорог страны.

Грунтовой считается любая дорога, не имеющая капитального твердого покрытия (асфальтобетонного, цементобетонного или т.п.), а представляющая собой земляное полотно, сформированное из естественного грунта или с добавлением минеральных материалов (песка, гравия, шлака или др.).

Грунтовые дороги Белоруссии можно условно разделить на три типа [26]:

- 1) улучшенные (имеют покрытие из песчано-гравийной смеси, щебня или т.п. и чаще всего относятся к автомобильным дорогам общего пользования V технической категории);
- 2) проселочные (представляют собой укатанные грунтовые дороги, иногда выравниваемые грейдерами, и могут относиться к местным дорогам общего пользования V технической категории либо к дорогам необщего пользования);
- 3) полевые и лесные (представляют собой две параллельные колеи, возникшие в результате движения транспорта, и чаще всего относятся к дорогам необщего пользования, к которым не применяется классификация по техническим категориям I–V).

Важно отметить, что дороги второго и третьего типов часто не устраиваются целенаправленно, а возникают естественным образом в результате регулярного проезда транспортных средств.

При строительстве улучшенных грунтовых дорог с покрытием в первую очередь проводят инженерно-геологические изыскания. Затем приступают к основным работам, среди которых: уплотнение грунта, организация водоотвода, подготовка дорожного корыта, устройство основания (в том числе дорожной подушки), укладка верхнего покрытия с последующим уплотнением и при необходимости с поверхностной обработкой.

Улучшенные грунтовые дороги с покрытием делят на песчаные, гравийные, щебёночные, песчано-гравийные, грунто-щебёночные и т.п.

Песчаные дороги подходят для участков с минимальной нагрузкой – например, для разъезда единичных автомобилей. При их строительстве снимается верхний слой грунта, затем уплотняются стенки и дно корыта, засыпается песок и тщательно трамбуется катком. Главный недостаток таких дорог – недостаточное возвышение над уровнем местности или его отсутствие, из-за чего они быстро разрушаются под тяжестью техники и размываются дождями [26].

При интенсивном движении колесного транспорта предпочтительнее использовать щебёночные дороги. Их устраивают в три этапа с применением щебня двух фракций: крупный щебень с размерами частиц 40×70 мм укладывают в корыто первым слоем, а поверх него – слой из мелкого щебня (40×20 мм). Тщательное соблюдение технологии позволяет мелким частицам заполнять пустоты между крупными, что обеспечивает высокую плотность покрытия.

Песчано-гравийные дороги часто строятся, например, в зонах садово-дачных участков. Их преимущество – невысокая стоимость и быстрое устройство. Технология строительства схожа с описанной выше: подготовка корыта, основания и

верхнего покрытия. Однако такие дороги менее устойчивы к воздействию воды и перепадам температуры, что сокращает срок их службы.

Оптимальным вариантом по многим параметрам является послойное устройство улучшенных грунтовых дорог с покрытием (из разных слоев щебня, гравия, песчано-гравийной смеси). С одной стороны, эта технология обеспечивает более высокую прочность и долговечность дорожного полотна, а с другой – улучшает дренажные свойства, благодаря чему снижается риск размывов и деформаций при неблагоприятных погодных условиях. Такая конструкция позволяет равномерно распределять нагрузку от транспортных средств на основание, минимизируя образование колеи и трещин. При строительстве первый слой создают из крупного щебня, который выполняет функцию жесткого основания и способствует отводу воды. Следующий слой (выравнивающий) отсыпают более мелким щебнем или песчано-гравийной смесью, что обеспечивает заполнение пустот, дополнительное уплотнение структуры и заклинивание зерен. Верхний слой устраивают из дорожно-строительных материалов еще более мелких фракций (мелкого щебня, песчано-гравийной смеси) для получения ровной и гладкой рабочей поверхности. Каждый слой как следует уплотняется катком, что обеспечивает максимальную плотность, улучшая характеристики дороги. Кроме прочего, послойное строительство позволяет в дальнейшем сравнительно легко проводить ремонтные работы и замену отдельных слоев без необходимости полного демонтажа покрытия [26].

Как было ранее отмечено, одной из первопричин воздействия дорог на массивы грунтов и геологическую среду в целом является изменение рельефа в результате сооружения насыпей, выемок и систем поверхностного водоотвода. Реализация данного фактора может идти либо путем изменения режима ряда природных геологических процессов, либо в результате возникновения новых инженерно-геологических процессов.

Особенности гидротопы

Одним из ярко выраженных последствий создания новых геоморфологических форм в процессе строительства автомобильных дорог является *изменение поверхностного стока воды* как одной из составляющих *гидротопы* рассматриваемых ЭГС. Прежде всего насыпи, расположенные в определенной конфигурации, могут прерывать естественное движение воды по поверхности грунтового массива. В результате этого участки земель, находящиеся ниже насыпи, могут частично осушаться. На участках выше насыпи при грамотно спроектированном земляном полотне, как правило, не происходит переувлажнения благодаря установленной системе для отвода

поверхностных вод. Однако при нарушении работы этой системы могут возникать проблемы с переувлажнением прилегающих к дороге территорий или боковых площадок, что может привести к образованию заболоченных земель.

Воздействие на геологическую составляющую ЭГС вследствие изменения условий стока может оказаться заметным, если по тем или иным причинам возникнет застой воды. Чаще всего это происходит на равнинных участках.

Заметное изменение гидрологических условий может наблюдаться при строительстве дорог на болотах. В этом случае водопропускные сооружения обычно выносят на край болота с целью устройства их фундаментов на прочном грунте. Однако при наличии стока это сопряжено с возможностью некоторого подъема уровня воды в болоте с верховой стороны [27].

Наряду с поверхностным стоком при строительстве автомобильных дорог изменяется и режим грунтовых вод. Так, вскрытие водоносных горизонтов при устройстве выемок приводит к трансформации фильтрационных характеристик грунтов и перераспределению потоков подземных вод. Перехват потока грунтовых вод выемкой может вызвать дефицит питания нижележащих водоносных горизонтов. Необходимость устройства дренажных систем для стабилизации откосов и основания выемки приводит к локальному понижению уровня грунтовых вод (УГВ). Наиболее чувствительна к таким изменениям верховодка, залегающая в линзах, которая может быть полностью ликвидирована. В то же время строительство дорожных насыпей на торфяных основаниях без предварительного выторфовывания и с использованием малопроницаемых грунтов может привести к нарушению естественной циркуляции воды в торфяной залежи и, как следствие, к подъему УГВ.

Особенности экологической геодинамической функции

Строительство и эксплуатация ЭГС автотранспортного комплекса часто являются причинами возникновения и развития различных экзогенных геологических и инженерно-геологических процессов и явлений, влияющих на *экологическую геодинамическую функцию* этих ЭГС. Среди таких процессов следует отметить водную эрозию, русловые процессы, выветривание, склоновые процессы, проседания поверхности территории из-за изменения напряженного состояния грунтов или суффозии и др. Например, при строительстве дорог изменение ландшафта и нарушение естественного стока воды могут привести к развитию водной эрозии. Особенно подвержены этому свежесформированные откосы дорожных выемок и насыпей. Их крутизна и недоуплотненность слагающего их грунта делают их уязвимыми. Проявлению эрозии могут



Рис. 7. Часть автомобильной дороги Р54 в Воложинском районе Минской области, которая была разрушена 30.05.2019 в результате водной эрозии из-за сильного ливня [28]

способствовать также вырубка леса в полосе отвода, корчевка пней, снятие почвенно-растительного слоя или его нарушение дорожными машинами, интенсивное выпадение атмосферных осадков, некачественная рекультивация нарушенных земель или ее отсутствие, проявления сопутствующих геологических процессов (выветривание, оползни, осыпи, оплывины и др.).

Водоотводные каналы также выступают в роли очагов интенсивной эрозии, особенно когда их продольные уклоны превышают допустимые или когда их сечения выбраны без должного обоснования. В результате таких недочетов каналы могут трансформироваться в овраги, что нередко наблюдается на участках строительства дорог, особенно там, где присутствуют лёссовидные грунты.

Местные грунтовые дороги, проложенные на территориях, подверженных эрозии, после размывов и образования промоин нередко выходят из строя и требуют ремонта практически каждый год. Это часто приводит к расширению овражной сети.

Изменение гидрологического режима рек в процессе создания мостов может приводить к активизации донной и боковой эрозии. В результате этого страдают опоры мостов, поскольку их фундаменты подвергаются вскрытию из-за данных процессов. Строительство дорог в сильно пересеченной местности приводит к созданию глубоких выемок, обнажающих грунты, ранее защищенные от воздействия внешних факторов окружающей среды. Обнажившись, эти грунты начинают интенсивно выветриваться, и из-за крутизны откосов продукты их разрушения осыпаются вниз, загрязняя каналы и проезжую часть. Нередко в откосах глубоких выемок и высоких насыпей автомобильных дорог можно наблюдать оползневые процессы (рис. 8). Чаще всего откосы оползают по причине плохой организации поверхностного стока воды с дороги, отсутствия водоотводных канав, слабого укрепления или устройства более крутых откосов, которые используемый грунт не может обеспечить.

Существенные проблемы при эксплуатации автомобильных дорог возникают из-за процессов, связанных с изменениями условий тепло- и массопереноса в верхних слоях грунта. Эти процессы связаны прежде всего с условиями эксплуатации дороги в зимнее время, а также с устройством искусственной системы поверхностного водоотвода. Очистка снега с проезжей части зимой вызывает увеличение глубины промерзания. По данным наблюдений, глубина промерзания под проезжей частью в 1,5–2,5 раза больше, чем в поле. При небольшой высоте насыпи, а также в выемках в зону промерзания после устройства дороги окажутся вовлеченными слои, ранее находившиеся за ее пределами. Это может вызывать текстурные изменения в слоях под влиянием влаги при промерзании и морозном пучении [27].

В целом можно подчеркнуть, что автомобильные дороги тесно взаимосвязаны с грунтовыми массивами. По этой причине дорога как инженерное сооружение подвергается постоянному воздействию геологических процессов.

Особенности экологической геохимической функции

С функционированием ЭГС автотранспортных комплексов в Белоруссии связано также химическое загрязнение грунтов, поверхностных и подземных вод, что, в сущности, обуславливает *экологическую геохимическую функцию* рассматриваемых ЭГС. Особенно остро данная проблема стоит при эксплуатации автомобильных дорог, вдоль которых часто возникают литохимические (педохимические) и гидрогеохимические полиэлементные аномалии с широкой ассоциацией элементов-загрязнителей. Например, исследования А.В. Матвеева и др. [30] показали, что в Белоруссии вдоль автодорог покровные грунты чаще всего загрязнены такими элементами, как Zr, Pb, Mn, Cu, Ti, Ni, Cr, V, значительно реже Ba, P, B. Причем максимальное количество таких контаминантов приурочено к полосе 40–80 м от полотна дороги, а заметное загрязнение прослеживается в зоне до 300 м. При этом, как отмечают авторы работы [30], распределение техногенных примесей в придорожных полосах довольно неравномерное и на отдельных участках их содержание может достигать величин, приближающихся к предельно допустимым концентрациям и даже превышающих их. Указано также, что степень загрязнения грунтов коррелирует не столько с рангом дороги (международного, республиканского, местного значения), сколько с интенсивностью движения по ней.

Остро в стране стоит проблема засоления земель, прилегающих к автомобильным дорогам. Это происходит из-за активного применения противогололедных реагентов (ПГР) в зимний период [31]. Основным таким реагентом является техническая



Рис. 8. Оползень на новой объездной дороге г. Гродно, произошедший 04.07.2021: а – вид сбоку; б – вид сверху [29]

соль (галит), которая на 96–98% состоит из хлорида натрия. В ее состав также входят примеси нитратов, фосфатов и сульфатов натрия и кальция. Эта соль используется как в чистом виде, так и в смеси с песком, чаще всего в пропорции 1:1 [32]. Ситуация усугубляется тем, что на некоторых участках дорог количество вносимых ПГР в два раза и более превышает установленные нормы [33]. Такое чрезмерное использование этих реагентов, особенно в сочетании с другими факторами, связанными с эксплуатацией дорог, неизбежно приводит к загрязнению грунтов, поверхностных и подземных вод.

Помимо солей и тяжелых металлов, значительную угрозу для грунтов и водных объектов на территории Белоруссии представляют нефтепродукты. Основными источниками их попадания в грунтовые массивы и заключенные в них подземные воды являются: разливы топлива при транспортировке по дорогам; сточные воды от станций технического обслуживания и ремонта автомобилей; склады горюче-смазочных материалов на автотранспортных предприятиях; автозаправочные станции.

Хотя современные АЗС и оснащены герметичным оборудованием, что снижает риск утечек топлива под землю, количество проливов у топливораздаточных колонок и на площадках слива топлива остается высоким. По оценкам, на каждую тонну бензина приходится до 100 г пролитого топлива, а на тонну дизельного топлива – до 50 г [35]. Эти проливы, а также движение транспорта и атмосферные осадки приводят к значительному загрязнению поверхностного стока. Исследования, проведенные на АЗС в крупных городах, показали, что поверхностный сток может содержать от 1,2 до 28,7 мг/дм³ нефтепродуктов [34].

Загрязненный поверхностный сток оказывает особенно сильное воздействие на грунтовый массив в тех случаях,

когда отсутствует ливневая канализация и системы очистки сточных вод. Не все АЗС оборудованы закрытыми системами водоотведения и очистными сооружениями. Однако даже при их наличии часть загрязненного стока (от 10 до 30%) проникает в грунтовую толщу через незамощенные участки, газоны и трещины в дорожном покрытии [34].

Особенности техноатмосфера

Нормальное функционирование автомобильных дорог и транспортных средств как главных технических составляющих эколого-геологических систем автотранспортного комплекса Белоруссии во многом зависит от особенностей атмосфера и климатотопоса данных ЭГС – части атмосферы с динамическими погодно-климатическими факторами. Причиной этого является то, что количественные параметры погодных условий напрямую формируют конкретные инженерные проблемы. Суточные колебания температуры, особенности циклов замерзания и оттаивания оказывают серьезное разрушительное воздействие. Высокие температуры воздуха (+30...+35 °С), несмотря на их относительную редкость, способствуют деформации асфальтобетонного покрытия, вызывая размягчение вяжущего и образование колеиности. В то же время низкие температуры делают материалы хрупкими, вызывая трещины в дорожном покрытии. Количество и интенсивность осадков определяют необходимость в эффективных системах дренажа и водоотвода, а также влияют на влажностный режим земляного полотна, что критически важно для его несущей способности [23]. Ветровые нагрузки сказываются на эрозии обочин, образовании и величине заносов снега. Все эти факторы ограничивают период активного строительства, требуя использования спе-

циальных технологий в неблагоприятные сезоны, и влияют на эксплуатационные характеристики дорог, их безопасность и долговечность.

Прогнозируемое отсутствие понижения минимальных температур воздуха до минус 35 °С и ниже к 2030–2040 гг., по данным НАН Белоруссии [35], хотя и снижает риски экстремальных морозов, но не отменяет необходимости учитывать другие, более частые, но менее интенсивные климатические воздействия, которые суммарно могут привести к значительному износу полотна автомобильных дорог. Важный момент, который часто упускается, заключается в том, что снижение экстремально низких температур не означает исчезновения проблем, связанных с морозом. Напротив, увеличение числа переходов через 0 °С становится еще более разрушительным фактором, требующим постоянного внимания к качеству материалов и проектирования автодорожного строительства.

Особенности техноэдафотоп

Почвы, находящиеся в сфере влияния эколого-геологических систем автотранспортного комплекса, классифицируются как техногенно измененные. Они представляют собой трансформированные под воздействием человеческой деятельности земельные ресурсы, в которых в определенной мере сочетаются характеристики почв горнодобывающих (при создании карьеров, валов, дамб и пр.) и селитебных территорий. С последними их объединяет не столько близость к населенным пунктам, сколько совокупность характерных общих признаков, таких как формирование почв на насыпных или перемешанных грунтах или культурном слое (например, при строительстве автотранспортных баз, предприятий придорожного сервиса и пр.); наличие в верхних слоях строительного, бытового и другого мусора; нейтральная или щелочная реакция среды; специфические физико-механические и другие свойства (например, высокая плотность, уплотненность, каменистость).

В зависимости от характера дневной поверхности, территории, занятые ЭГС автотранспортного комплекса, подразделяются на два основных типа – открытые (с частичным озеленением) и закрытые (застроенные и заасфальтированные) [36].

На открытых пространствах выделяют четыре основные категории поверхностных почвенно-грунтовых образований:

- 1) естественно-антропогенные почвы с поверхностными преобразованиями;
- 2) антропогенно глубоко измененные почвы;
- 3) молодые почвы, возникшие на обнажившихся или насыпных породах;

4) искусственно созданные почвоподобные образования (технозёмы), которые формируются при рекультивации территорий, пострадавших от различных аварий на транспорте (например, разливы опасных химических веществ, нефтепродуктов и пр.).

На территориях с асфальтовым покрытием второго типа под асфальтобетонным слоем или иным дорожным покрытием появляются особые образования – запечатанные грунты, в том числе экранозёмы³.

Естественно-антропогенные поверхностно-преобразованные почвы выделяются тем, что верхний слой почвы глубиной до 50 см подвергается повреждению, трансформации или обогащению внесенными материалами, тогда как средние и нижние горизонты сохраняют природную структуру. Их подразделение основывается на исходном типе почвы с добавлением первой части «техно-» (например, технодерновые, технодерново-подзолистые и др.). Такие почвы, как правило, встречаются в придорожных полосах автомагистралей.

Антропогенно глубоко преобразованные почвы включают механически и химически преобразованные почвы и технозёмы. Механически преобразованными называют почвы, которые подверглись сильным изменениям вследствие глубокого вскрытия, перемешивания и перестройки почвенного профиля (например, при выемках грунта для фундаментов зданий, прокладке коммуникаций, ландшафтных планировках и т.п.). В их составе отсутствуют естественные генетические почвенные горизонты.

Химически преобразованные почвы характеризуются морфологическими изменениями, вызванными воздействиями вредных химических веществ, приводящими к серьезному загрязнению и стратификации техногенных субстратов (примером являются почвы на территориях разлива нефтепродуктов при авариях). В этих почвах существенно меняются генетические горизонты, образуются новые слои, характерные для почвообразования с техногенным воздействием. Получившийся профиль может частично напоминать естественный, но чаще он представляет собой уникальное почвенно-техногенное образование без точных природных аналогов. В таком профиле меняются процессы миграции веществ, гумусообразования и другие почвенные процессы.

Молодые почвы, развивающиеся на техногенных субстратах, находятся на начальных стадиях формирования и встречаются на рыхлых или плотных природных или техногенных грунтах (наиболее ранние из них называют эмбриозёмами). Они имеют слабый, органогенный верхний слой мощностью менее 5 см, а их нижние горизонты формируются из естественных

³ В инженерно-геологическом контексте экранозёмы можно рассматривать как разновидность запечатанных грунтов, поскольку в инженерной геологии почвы относят к грунтам (прим. ред.).

Таблица 2. Средние показатели элементов загрязнителей (мг/кг сухого вещества) в почве лесных фитоценозов на различном удалении от дорожного полотна [32]

Расстояние от полотна дороги, м	Тяжелые металлы						Компоненты ПГР	
	Ni	Co	Pb	Cu	Zn	Cd	Cl ⁻	Na ⁺
0–5	24,1±1,85	2,7±0,50	12,6±0,82	38,9±3,58	34,0±2,70	>9,4±0,12	69,9±16,89	110,8±16,90
10	25,7±1,21	3,2±0,46	11,5±0,74	35,5±2,39	30,7±1,58	>9,4±0,05	58,2±11,41	61,2±16,21
20	27,3±1,84	3,7±0,45	11,9±0,72	33,8±2,08	30,4±1,72	>9,4±0,09	58,2±6,82	38,3±5,99
35	25,7±2,57	4,1±0,0,48	10,6±0,77	33,1±2,58	29,5±1,20	>9,4±0,04	52,1±8,67	18,0±3,50
150	25,1±2,12	3,8±0,47	12,2±0,78	34,9±2,54	28,4±0,12	>9,4±0,04	49,0±10,93	14,8±5,67
300	22,8±1,82	3,5±0,55	12,7±0,82	30,3±2,70	28,4±0,15	>9,4±0,05	39,2±2,49	5,0±0,37
Среднее значение	25,1	3,5	11,9	34,4	30,3	9,4	54,2	41,9

или насыпных грунтов (например, на откосах дорожных выемок и насыпей). По сути, эти почвы представляют собой литогенные почвоподобные образования [36].

Искусственные почвоподобные образования, называемые техноземами, создаются в результате технических мероприятий по восстановлению земель, пострадавших от человеческой деятельности. Они характеризуются наличием насыпных горизонтов (из природных или техногенных материалов) общей мощностью свыше 50 см и потенциально плодородного поверхностного слоя. В отличие от естественных почв, технозёмы не имеют генетической связи между составляющими их слоями и, следовательно, не обладают развитой системой генетических горизонтов, несмотря на выполнение почвенных функций.

Строительство дорог и транспортной инфраструктуры неизбежно ведет к тому, что почва и другие грунты оказываются запечатанными (см. рис. 6, 7). Почвы, погребенные под дорожными покрытиями (экрanoзёмы), подвергаются серьезным трансформациям: они становятся сильно уплотненными, нарушается их водный, тепловой и газовый баланс, а населяющие их микроорганизмы сталкиваются с дефицитом кислорода. Эти почвы лишены возможности получать питательные вещества извне, а их верхние слои часто повреждаются в процессе строительства. Удаление плодородного слоя перед прокладкой дороги с последующим его покрытием строительными материалами приводит к формированию соответствующих запечатанных грунтов [36].

Почвы эколого-геологических систем автотранспортного комплекса, как и грунты литотопов этих ЭГС, в значительной степени подвержены химическому загрязнению. Причем источники и элементный состав загрязнений в обеих средах практически идентичны.

В этом плане представляет интерес исследовательская работа А.В. Судника и соавторов [31–33], посвященная изучению загрязнения придорожных территорий в результате

эксплуатации и содержания автомобильных дорог в Белоруссии. В качестве объектов исследования ими были выбраны отдельные участки основных автомобильных магистралей: М1/Е30 «Брест (Козловичи) – Минск – граница Российской Федерации (Редьки)», М3 «Минск – Витебск», а также М9 «Минская кольцевая автомобильная дорога» (МКАД). Для мониторинга загрязнения придорожных зон компонентами противогололедных реагентов (ПГР) проводился отбор образцов почв (в двух горизонтах: 0–10 и 10–20 см), лесной подстилки и зеленых мхов на расстояниях 5, 10, 20, 35, 150, 300 м от МКАД (всего было отобрано 192 образца) с учетом рельефа участка (в выемке, на насыпи и при условных нулевых отметках естественной поверхности земли) согласно методическим рекомендациям [37]. Результаты этих исследований приведены в таблице 2.

Анализ результатов пространственного распределения привнесенных химических элементов, рассеянных в почве, снежном покрове и компонентах лесных фитоценозов, позволил авторам статьи [1] установить, что наибольший вред наносится, как правило, непосредственно опушечным территориям вдоль автодорог. Были определены три зоны с различной степенью накопления загрязняющих веществ: первая (0–5 м от полотна дороги) – с их концентрацией, превышающей средний уровень в 2 раза и более; вторая (5–35 м) – со средней концентрацией; третья (35–300 м) – с концентрацией ниже средней. Открытые территории способствуют переносу загрязнителей (главным образом с воздушным потоком) на более дальние от проезжей части участки. При отсутствии защитного древесного барьера вдоль полей содержание загрязнителей в снежном покрове зимой, а в растительности летом остается значительным даже на расстоянии 300 м от дороги, при этом максимальные концентрации наблюдаются в пределах первых 150 м.

По итогам проведенного анализа загрязнения почвенно-растительного покрова придорожных территорий комплексом

техногенных металлов и компонентов ПГР было установлено, что на этих территориях происходит долговременное накопление различных привнесенных химических элементов и формируются относительно четкие градиенты их содержания в пространстве [32].

ОСОБЕННОСТИ БИОТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ ЭГС АВТОТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА БЕЛОРУССИИ

Особенности техномикробиоценоза

Микроорганизмы, включая простейших, водоросли, грибы, актиномицеты и бактерии, являются неотъемлемой частью техномикробиоценоза эколого-геологических систем автотранспортного комплекса Белоруссии, как и других подобных систем. Большая часть этих микроорганизмов обитает в почве, где они играют ключевую роль в поддержании экосистемных процессов и биогеохимических циклов. Однако, несмотря на их важность, микробное разнообразие рассматриваемых ЭГС в стране практически не изучено. Это затрудняет понимание влияния антропогенных факторов, связанных с автотранспортом, на микробное разнообразие и функции почвенных экосистем. Тем не менее исследования, проведенные И.Д. Свистовой, И.И. Корецкой, А.П. Щербак-ковым, Х.А. Джувеликян и другими [38, 39 и др.], предоставляют ценную информацию для характеристики особенностей видового состава и эколого-трофической структуры микробных сообществ (МСО) в контексте функционирования ЭГС автотранспортного комплекса.

В частности, И.Д. Свистовой с коллегами [38] на одном из отрезков (485–490 км) автомагистрали «Дон» были выполнены мониторинговые исследования автотранспортного загрязнения черноземной почвы на разных элементах рельефа в открытых придорожных экосистемах (ПЭС) на расстояниях 10, 50 и 100 м от полотна дороги, а также перед и за лесополосой продуваемого типа (10 и 30 м от трассы) в придорожных лесомелиоративных ландшафтах. Исследования включали анализ содержания тяжелых металлов (ТМ) и нефтепродуктов в почве, численности эколого-трофических групп почвенной микрофлоры, а также расчеты показателей структуры микробных сообществ, таких как коэффициент иммобилизации азота, коэффициент олиготрофности и соотношение мицелиальных форм. Результаты этих исследований сводятся к следующему.

В почвенном покрове накопление ТМ наблюдается только в верхнем его слое. На расстояниях 10 и 50 м почва является среднезагрязненной, а на расстоянии от дороги 100 м – сла-

бозагрязненной. Превышение ПДК на равнинных участках местности на расстоянии 10 м от дороги зафиксировано только для свинца (в 1,3 раза) и кадмия (в 1,2 раза). На пониженных участках рельефа, куда с дороги вместе с талой и дождевой водой сносится осевшая пыль, содержание подвижных форм данных металлов превышало ПДК в 1,3–1,5 раза на расстоянии 10 м и 1,2–1,3 раза на расстоянии 50 м. Для всех эколого-трофических групп почвенной микрофлоры наблюдалось закономерное снижение численности по мере приближения к автотрассе. Особенно заметны были эти изменения летом в период иссушения почвы. В качестве фонового уровня была выбрана точка забора проб на расстоянии 100 м от дороги в открытой придорожной экосистеме с ровным рельефом.

Степень снижения численности (антропоотолерантность) различных групп микроорганизмов сильно различалась. Наиболее чувствительными оказались бактерии-иммобилизаторы азота: их численность снижалась по сравнению с фоном в 4–4,5 раза на ровных участках и в 5,8–6,3 раза на пониженных участках рельефа. Грибы также показали существенное сокращение – в 2,5–3 раза и 3–4 раза соответственно. Содержание азотобактера (процент обрастания почвенных агрегатов) уменьшалось практически до нуля у кромки дороги. Более устойчивыми оказались бактерии-аммонификаторы, олигонитрофилы и актиномицеты: их численность снижалась у трассы в 1,5–2 раза по сравнению с фоном. Наиболее сильное угнетение микрофлоры всех эколого-трофических групп отмечалось в открытых придорожных экосистемах на пониженных участках рельефа. Численность микроорганизмов не достигала фонового уровня даже на расстоянии 100 м от трассы. Для устойчивых групп почвенной микрофлоры динамика роста численности с удалением от дороги была аналогична таковой на ровных участках, тогда как для более чувствительных групп наблюдалось отставание. Так, концентрация азотобактера на расстоянии 50 м практически не увеличивалась, а на удалении 100 м составляла лишь около 15% от фонового значения. Лесомелиоративные полосы выступили в роли наилучшего барьера для аэротехногенных выбросов автотранспорта: уже в 30 м за лесополосой численность всех групп почвенной микрофлоры соответствовала фоновой.

Различия в антропоотолерантности эколого-трофических групп почвенной микрофлоры привели к нарушению структуры микробного сообщества. Коэффициенты олиготрофности и соотношения мицелиальных микроорганизмов оставались стабильными во всех точках отбора, однако коэффициент иммобилизации азота у полотна дороги (1,4–1,6) существенно уступал фоновым значениям (3,1–3,7), особенно на участках пониженного рельефа – на расстоянии от автотрассы до 50 м.

Снижение этого показателя отражает уменьшение способности микрофлоры связывать и удерживать минеральный азот в биомассе, что ведет к нарушению азотного цикла в почве [38].

Активность почвенной микрофлоры оценивалась по уровню выделения из почвы углекислого газа и по потенциальной активности азотфиксации. Биологическая активность почвы у автомобильного полотна снижалась значительно сильнее: эмиссия CO₂ уменьшалась в 3–3,5 раза, а потенциальная активность азотфиксации – в 20 раз. На пониженных участках рельефа на расстоянии 100 м от дороги уровень азотфиксации составлял только около 12% от фонового значения. Это свидетельствует о том, что физиологическая активность микроорганизмов подавлялась гораздо сильнее, чем их численность.

Сокращение биоразнообразия микробного сообщества вблизи автомагистрали было продемонстрировано на примере почвенных микромицетов. Общая плотность типичных видов грибов у кромки дороги увеличивалась с 43% до 77–81% за счет вытеснения редких и случайных видов. Такая тенденция, известная как «концентрация доминирования», может привести к снижению устойчивости микробных сообществ техногенно измененной почвы, расположенной рядом с автотрассой [40].

Изменения касались и видового состава микроорганизмов. Некоторые грибы, типичные для фоновых участков, становились редкими или случайными у дороги, тогда как на почве около автодороги появлялись новые виды, нехарактерные для естественных почв. Значения коэффициента сходства между пробами, взятыми в 10 и 100 м от автотрассы, колебались в пределах 0,44–0,65. На пониженных участках рельефа число общих видов грибов уменьшалось, а различия в структуре микробиоценозов проявлялись особенно четко на уровне доминирующих видов.

Все типичные микромицеты авторы исследования [38] разделили на три группы:

- 1) виды, чувствительные к антропогенной нагрузке (преобладали на расстоянии 100 м, но отсутствовали вдоль полотна дороги);
- 2) устойчивые виды (их частота встречаемости оставалась стабильной);
- 3) виды-индикаторы загрязнения (их доминирующее положение резко возрастало вблизи автотрассы).

К первой группе относились фитопатогенные грибы (*Botrytis cinerea* и виды рода *Fusarium*), а также грибы, развивающиеся на растительных остатках (*Rhizopus stolonifer* и *Chaetomium* sp.). Снижение их встречаемости, вероятно, связано с угнетением растительности в придорожной зоне. Например, вид *Botrytis cinerea* исчезает уже на 100-метровом удалении от дороги, особенно на участках с пониженным рельефом.

Во вторую группу входят эвритопные виды с широким экологическим диапазоном. Однако на пониженных участках

рельефа наблюдались некоторые изменения состава: вид *Alternaria tenuis* из доминирующих переходил в категорию часто встречающихся, эпифит *Cladosporium herbarum* из группы устойчивых переходил в группу чувствительных видов, появлялись новые виды, такие как *Penicillium chrysogenum* (ранее – *P. notatum*) и *Trichoderma harzianum*.

Наибольший интерес для мониторинговых исследований представляет третья группа видов. Эти виды, ранее редкие или отсутствовавшие в фоновых черноземах, становились часто встречающимися в техногенно измененных почвах около автотрассы (пенициллы *P. funiculosum*, *P. terlikowskii*, *P. rugulosum*, аспергиллы *A. terreus*, *A. ochraceus*, *A. fumigatus* и *Paecilomyces farinosum*). На участках с пониженным рельефом численность этих видов возрастала, при этом *P. funiculosum* и *A. terreus* становились доминирующими в микробном сообществе.

Некоторые виды грибов, устойчивые к загрязнению, содержат темные пигменты, обладающие антиоксидантными свойствами, которые защищают их от неблагоприятных абиотических факторов, таких как высыхание, интенсивное солнечное излучение и радиоактивное облучение [41]. Другие устойчивые и индикаторные виды способны синтезировать токсины с антибиотическим, фунгицидным, фитотоксичным и зоотоксичным действием [42, 43]. По всей вероятности, именно такие особенности их метаболизма обеспечивают им преимущества в усиливающейся конкурентной борьбе с другими грибами в условиях техногенного загрязнения (явление, называемое некоторыми авторами метаболическим регулированием).

Исследование фитотоксических свойств почвы с использованием биотестов выявило, что формирование инициированного микробного сообщества стимулирует рост микроорганизмов, одновременно приводя к возрастанию фитотоксичности на 10–14%. Это указывает на существенный вклад микроорганизмов в развитие фитотоксикоза почвы. На расстоянии 10 м от автотрассы фитотоксичность превышала контрольный уровень в 10–15 раз для нативной почвы и в 3–5 раз для инициированного микробного сообщества, при этом фитотоксикоз почвы сохранялся на расстоянии до 50 м от трассы. В условиях пониженного рельефа местности фитотоксичность почвы в диапазоне 8–12% была зафиксирована даже на 100-метровом удалении. Примечательно, что в закрытых придорожных экосистемах за лесополосой на расстоянии 30 м от автотрассы токсические эффекты в почве отсутствовали [37].

Особенности технофитоценоза

Фитоценозы автомобильных дорог, находящиеся под непрерывным антропогенным прессом (включая кошение,

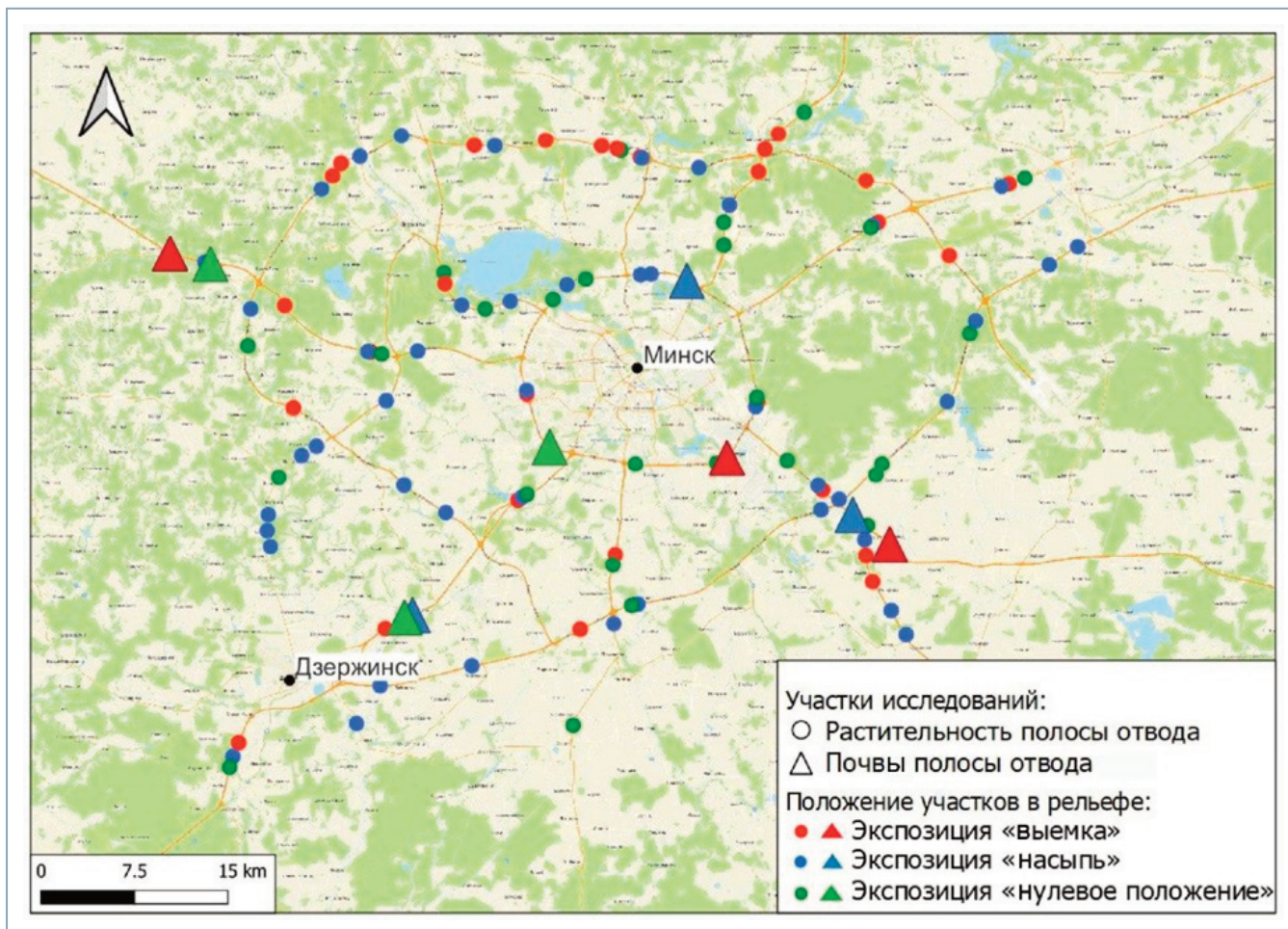


Рис. 9. Местоположение участков исследований придорожной травянистой растительности с учетом отбора образцов почвы [48]

эрозию почв, загрязнение поллютантами от автотранспорта и солевыми компонентами противогололедных реагентов) формируют экотон – своеобразную буферную зону между природными экосистемами, агрофитоценозами и искусственными объектами дорожной инфраструктуры. Морфология данной растительности определяется конструктивными особенностями полосы отвода, интенсивностью дорожного движения и характером мероприятий по уходу. Эти растительные сообщества характеризуются специфической сукцессионной стадией, доминирующими видами которой являются синантропы, что свидетельствует о регрессионных изменениях естественной растительности в условиях постоянного антропогенного воздействия [44].

Исследования Е.С. Шавалды с коллегами [45–48], посвященные эколого-флористическому анализу придорожной растительности в полосах отвода вдоль автомобильных дорог центральной части Белоруссии, выявили значительное видовое разнообразие. Работы проводились в 2021–2023 гг. в Минске в пределах МКАД и Минской области (рис. 9). В ходе исследований этими авторами было выполнено 635 геоботанических описаний на площадках размером 25–50 м² в зависимости от конфигурации полосы отвода (рис. 10). Для классификации

использовался метод Браун-Бланке, а обилие видов оценивалось по одноименной шкале [49, 50].

По итогам работ было выделено 3 класса растительных сообществ (*Polygono-Poetea annuae*, *Artemisietea vulgaris*, *Molinio-Arrhenatheretea*), 4 порядка, 6 союзов, 11 ассоциаций, 19 вариантов и 2 безранговых сообщества.

Класс *Polygono-Poetea annuae* представлен антропоотолерантными синантропными фитоценозами вдоль участков полосы отвода с сильным уплотнением, эрозией и перегревом почвенного покрова. Сообщества в основном представлены низкорослыми синантропными видами, стойкими к вытаптыванию и уплотнению интенсивно вымываемого грунта, что подтверждается единственной обнаруженной ассоциацией *Polygonetum arenastri* данного класса [47]. Диагностические виды класса *Polygono-Poetea annuae* (согласно литературным источникам для Белоруссии): *Lolium perenne*, *Plantago major*, *Polygonum arenastrum*, *Trifolium repens*, *Lepidium ruderales*, *Poa annua*, *Taraxacum officinale*, *Potentilla anserina* [47, 51].

Класс *Artemisietea vulgaris* представлен в основном синантропными видами с высокой долей двулетников и многолетников. Сообщества данного класса встречаются в секторах 2–3 (4) на участках всех экспозиций (см. рис. 9, 10) и в

секторе 1 на участках с плотной дерниной⁴. Для синтаксонов данного класса характерно доминирование высокорослых травянистых растений на богатых почвах, что подтверждается их преимущественным распространением в кюветах насыпей и выемок (см. рис. 9, 10) за счет частого отсутствия периодического сезонного кошения вдоль автодорог, смыва грунтово-почвенных материалов с откосов и их накоплением в кюветах. В состав класса входят 4 ассоциации и 2 безранговых сообщества. Диагностические виды класса *Artemisietea vulgaris*: *Artemisia vulgaris*, *Elytrigia repens*, *Tanacetum vulgare*, *Oenothera biennis*, *Artemisia absinthium*, *Carduus crispus*, *Cirsium vulgare*, *Arrhenatherum elatius*, *Dactylis glomerata* [47, 51].

Класс *Molinio-Arrhenatheretea* характерен для участков полосы отвода с наибольшей сохранностью напочвенного покрова и разнообразием видов. Для этого класса типичны свойства постоянно скашиваемого луга, пастбища и вторичной растительности, развивающейся под постоянным антропогенным прессом на развитых почвах. Он представлен шестью ассоциациями. Диагностические виды данного класса: *Achillea millefolium*, *Dactylis glomerata*, *Festuca pratensis*, *Festuca arundinacea*, *Scorzoneroideis autumnalis* (ранее – *Leontodon autumnalis*), *Poa pratensis*, *Deschampsia cespitosa*, *Festuca rubra*, *Rumex crispus* [52].

Обобщая полученные результаты, авторы работ [45–48] приходят к выводу, что сообщества классов *Polygono-Poetea annuae* и *Artemisietea vulgaris* характерны для наиболее нарушенных участков полос отвода, при этом *Polygono-Poetea annuae* ассоциируется преимущественно с участками с выраженным развитием эрозионных процессов и высокой плотностью почвенного субстрата. В противоположность этому, класс *Molinio-Arrhenatheretea* включает в себя большинство фитоценозов с относительно сохраненным напочвенным покровом. Основу этих фитоценозов составляют виды, часто используемые в травосмесях (например, *Bromopsis inermis*, *Dactylis glomerata*, *Elytrigia repens*, *Festuca arundinacea*, *Festuca pratensis*, *Festuca rubra*, *Lolium perenne*, *Poa pratensis*), а также индикаторы нерегулярного ухода – виды, указывающие на чрезмерную или недостаточную периодичность покоса и проблемы с водным режимом (*Calamagrostis epigeios*, *Conyza canadensis*, *Solidago canadensis*, *Phragmites australis*, *Phalaroides arundinacea*). Доминирование инвазивного золотарника канадского (*Solidago canadensis*) в некоторых сообществах свидетельствует о негативных изменениях придорожной растительности при отсутствии надлежащего ухода со стороны дорожных служб и подчеркивает значительную роль автодорог в распространении чужеродных видов, которые представляют угрозу для местных экосистем.

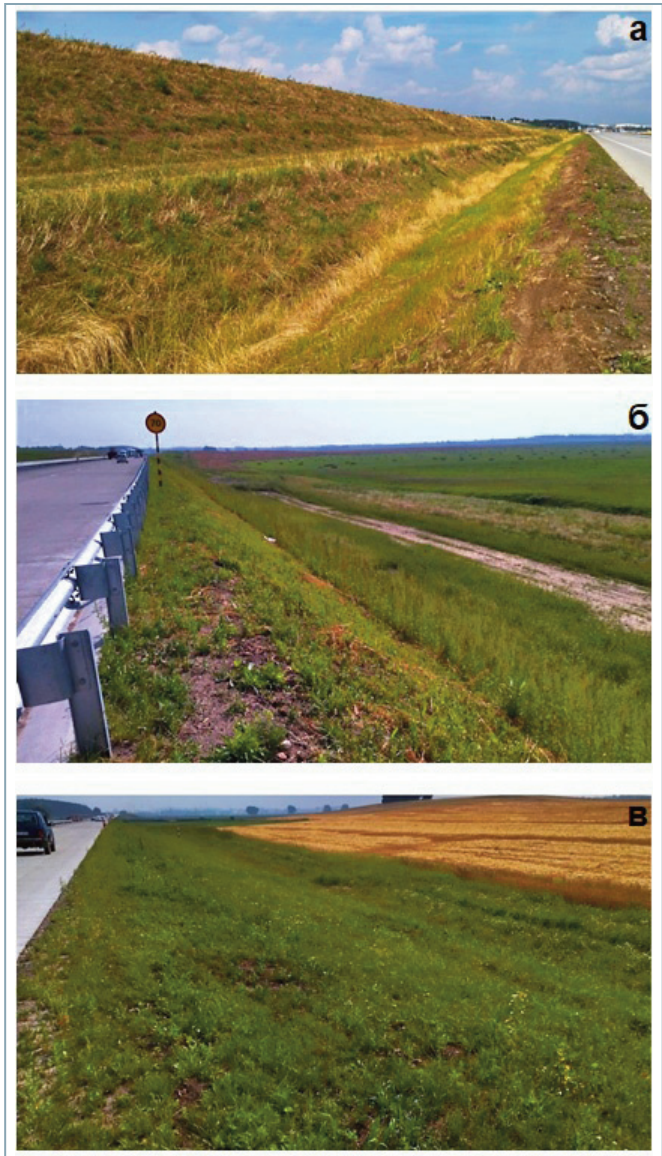


Рис. 10. Типичные конфигурации полос отвода вдоль автомобильных дорог Минской области: а – выемка, б – насыпь, в – нулевое положение [45]

Важным фактором произрастания придорожных фитоценозов является химическое загрязнение тяжелыми металлами и соевыми компонентами ПГР (ионами натрия и хлора). Типичными признаками поражения растений высокими концентрациями ТМ являются:

- снижение активности ферментов дыхания и фотосинтеза, поступления ряда веществ в клетки и ткани растений;
- задержка роста;
- повреждение корневой системы и ее хлороз (при наличии кадмия в почве в концентрациях 1–13 мг/кг);
- снижение фотосинтеза и транспирации;
- хлороз листьев и стеблей;
- желтая пятнистость листьев с последующим некрозом;
- «уродливые» формы (морфологические аномалии) растений;

⁴ Вероятно, авторы имеют в виду следующую условную нумерацию секторов МКАД (1 (северный сектор): 0–14 км длины МКАД; 2 (восточный): 14–28 км; 3 (южный): 28–42 км); 4 (западный): 42–56 км (прим. ред.).

- задержка роста корней и молодых побегов (при содержании никеля в почве 30–100 мг/кг);
- снижение интенсивности дыхания и фотосинтеза;
- увеличение поступления кадмия и снижение количества цинка в тканях растений;
- увядание растений;
- темно-зеленая окраска листьев (при содержании в почве свинца 100–500 мг/кг);
- хлороз молодых листьев и побегов (при наличии цинка в почвенном покрове в концентрациях 140–250 мг/кг) [52, 53].

В структуре фитоценозов в условиях постоянного химического загрязнения наблюдается угнетение аборигенной растительности с формированием специфических сообществ нарушенных территорий с доминированием рудеральных (сорных и адвентивных) видов [54]. Изменение концентрации тяжелых металлов в почве приводит к дифференциации некоторых аборигенных видов [55]. Для двулетних и многолетних трав высокая загрязненность почв приводит к уменьшению биометрических параметров растений [56]. Следует отметить, что незначительное повышение концентрации ТМ в почве не всегда оказывает пагубное влияние на растительность: негативные эффекты проявляются только при превышении порогового уровня токсичности [57]. Определить воздействие ТМ на состав и структуру растительных сообществ вдоль дорог затруднительно из-за сложного взаимодействия различных элементов и невозможности учесть все природные и антропогенные факторы. Поэтому при оценке растительности придорожных территорий следует принимать во внимание вероятностную устойчивость фитоценозов к уровню химического загрязнения почв.

Весьма своеобразным является негативное воздействие солей на придорожные растения. Оно включает в себя как минимум две составляющие – осмотическую и токсическую [58]. Осмотическое действие солей проявляется в том, что они создают в почве условия, при которых растениям крайне сложно поглощать воду, даже если она присутствует. Это происходит из-за снижения водного потенциала почвы, что приводит к дефициту воды в тканях растений и нарушению их внутреннего водно-солевого обмена. Этот водный стресс усугубляется токсичностью солей: избыток ионов накапливается в клетках, вызывая их повреждение, что проявляется в виде участков некроза на хвое и стеблях, особенно при резком увеличении концентрации солей. Помимо этого, высокое содержание солей в почве приводит к ее подщелачиванию, что изменяет доступность питательных веществ для растений, делая их менее подвижными и затрудняя их усвоение корнями. Более того, избыток натрия, часто присутствующего в солевых смесях, ухудшает структуру почвы, вызывая диспергирование почвенных агрегатов. Это препятствует нормальному движению

воды и дренированию, за исключением песчаных почв. В результате чрезмерное применение смесей солей для борьбы с гололедом приводит к серьезным последствиям для зеленых насаждений, снижая их жизнеспособность и внешний вид в период вегетации [32, 59].

Особенности технозооценоза

Технозооценозы изучаемых эколого-геологических систем представлены как беспозвоночными, так и позвоночными животными. Данное разнообразие в значительной степени определяется особенностями функционирования технических подсистем ЭГС, а также характеристиками литотопа, эдафотопа и фитоценоза, описанными ранее.

Аналогично большинству природных, природно-техногенных и техногенных ЭГС, в исследуемых экосистемах доминируют беспозвоночные. К ним относятся насекомые (*Insecta*), кольчатые черви (*Annelida*), паукообразные (*Arachnida*), в том числе пауки (*Araneae*) и клещи (*Acari*), и брюхоногие моллюски (*Gastropoda*). Среди насекомых, играющих ключевую роль в функционировании данных ЭГС, выделяются представители отрядов *Coleoptera* (жуки), *Lepidoptera* (чешуекрылые), *Odonata* (стрекозы) и *Hymenoptera* (перепончатокрылые). Эти таксономические группы демонстрируют высокую степень адаптации к антропогенно измененным условиям и занимают важные экологические ниши в ЭГС автотранспортного комплекса.

Функциональная значимость беспозвоночных в экосистемах объектов автотранспортной инфраструктуры является существенной, поскольку они выполняют комплекс функций, направленных на поддержание экологического равновесия. Например, насекомые, такие как представители отрядов *Coleoptera* и *Hymenoptera*, активно участвуют в процессах деструкции органического вещества, что способствует улучшению физико-химических свойств почвы и поддержанию ее продуктивности. Кроме того, они выступают в качестве трофического ресурса для многих позвоночных животных, в частности птиц, обеспечивая тем самым межъярусные связи в пищевых сетях.

Кольчатые черви играют критически важную роль в процессах аэрации почвенного профиля и трансформации органических субстратов, что создает благоприятные условия для развития растительных сообществ в придорожных полосах. Их деятельность способствует формированию более резистентных экосистем, способных к адаптации к антропогенным воздействиям.

Пауки (практически все из которых являются хищниками) и клещи (некоторые из которых тоже хищники) регулируют численность других групп беспозвоночных, предотвращая их неконтролируемое размножение и тем самым поддерживая гомеостаз в экосистеме.

Брюхоногие моллюски, предпочитающие влажные биотопы, также вносят вклад в поддержание санитарного состояния экосистем. Их присутствие и динамика численности могут служить биоиндикаторами состояния экосистемы, поскольку изменения в их популяциях могут свидетельствовать о наличии нарушений в этой системе.

Ежегодно с приходом тепла в Белоруссии часто наблюдается удивительное природное явление – массовый вылет подёнок (*Ephemeroptera*), прозванных в народе метлицами за их «метельные» скопления. Они образуют огромные рои над автомобильными дорогами. Несмотря на короткую жизнь этих эфемерных насекомых (от нескольких часов до нескольких дней), их численность может быть настолько велика, что они способны забивать радиаторы автомобилей, вызывая остановку двигателей. Схожие проблемы на дорогах создают и другие назойливые насекомые, такие как комары (*Culicidae*) и мошки (*Simuliidae*) (рис. 11).

Среди позвоночных территории Белоруссии, экологически связанных с ЭГС автотранспортного комплекса, выделяют многих представителей основных групп животных. Здесь находят себе место земноводные и рептилии, птицы и млекопитающие. Например, из земноводных вблизи автомобильных дорог можно встретить все 11 видов лягушек и жаб, обитающих в республике. В стране выявлено около 500 мест, где эти животные совершают миграции через проезжую часть. Пик таких перемещений приходится на весенний период (в апреле – мае), когда земноводные направляются к водоёмам для размножения. Именно в это время они больше всего гибнут на дорогах, что приводит к существенному сокращению их популяций.

Из рептилий вблизи дорог Белоруссии часто можно встретить прыткую ящерицу (*Lacerta agilis*), живородящую ящерицу (*Zootoca vivipara*), веретеницу ломкую (*Anguis fragilis*), обыкновенного ужа (*Natrix natrix*), гадюку обыкновенную (*Vipera berus*).

Многочисленно видовое разнообразие птиц. В зонах влияния автотранспортных магистралей обитают как лесные виды, так и представители открытых лугово-полевых ландшафтов, а также водных и прибрежных зон. Присутствуют как гнездящиеся, так и перелетные формы.

Основу сообществ составляют виды европейского происхождения, характерные для широколиственных и смешанных лесов, принадлежащие следующим семействам: врановые (*Corvidae*), вьюрковые (*Fringillidae*), голубиные (*Columbidae*), дроздовые (*Turdidae*), завирушковые (*Prunellidae*), крапивниковые (*Troglodytidae*), мухоловковые (*Muscicapidae*), пищуховые (*Certhiidae*), поползневые (*Sittidae*), синицевые (*Paridae*), скворцовые (*Sturnidae*), славковые (*Sylviidae*), соколиные (*Falconidae*), стрижиные (*Apodidae*), трясогузковые (*Motacillidae*) и др.



Рис. 11. Атака автотранспорта насекомыми на трассе М6 «Минск – Гродно» в июне 2022 года [60]

В лесных массивах, прилегающих к автомобильным дорогам, часто встречаются такие виды, как пеночка-трещотка (*Phylloscopus sibilatrix*), пеночка-теньковка (*Phylloscopus collybita*), зяблик (*Fringilla coelebs*), большая синица (*Parus major*), лесной конек (*Anthus trivialis*), крапивник (*Troglodytes troglodytes*), лесная завирушка (*Prunella modularis*), обыкновенная кукушка (*Cuculus canorus*), пестрый дятел (*Dendrocopos major*), сойка (*Garrulus glandarius*) и многие другие.

На территориях вдоль крупных магистралей, особенно вблизи населенных пунктов, наблюдается высокая численность таких синантропных видов, как серая ворона (*Corvus cornix*), галка (*Corvus monedula*), грач (*Corvus frugilegus*), сорока (*Pica pica*), белый аист (*Ciconia ciconia*), воробей полевой (*Passer montanus*), воробей домовый (*Passer domesticus*). Там также велика численность таких птиц, связанных с сельскохозяйственными угодьями, как чекан луговой (*Saxicola*



Рис. 12. Лось на трассе М6 «Минск – Гродно» [62]

rubetra), чибис (*Vanellus vanellus*), жаворонок полевой (*Alauda arvensis*), овсянка обыкновенная (*Emberiza citrinella*) и др. Встречаются и хищные птицы: канюк обыкновенный (*Buteo buteo*), лунь болотный (*Circus aeruginosus*), лунь луговой (*Circus pygargus*) и др.

У водотоков и водоемов, расположенных вблизи автомобильных дорог, обитают представители околородно-болотного и прибрежно-водного экологических комплексов. Среди них выделяются: цапля серая (*Ardea cinerea*), лебедь-шипун (*Cygnus olor*), кряква (*Anas platyrhynchos*), чирок-трескунок (*Anas querquedula*), озерная чайка (*Larus ridibundus*), ласточка береговая (*Riparia riparia*), черныш (*Tringa ochropus*) и др. Широко распространены соловей восточный (*Luscinia luscinia*).

В целом следует отметить, что придорожные пространства территории Белоруссии являются ценными ресурсами для орнитофауны, предоставляя птицам необходимые условия для успешного гнездования: доступ к пищевым ресурсам, места для временного пребывания во время миграционных путей и укрытия от неблагоприятных погодных условий, особенно в зимний период.

Что касается млекопитающих, то в полосе отвода автомобильных дорог можно встретить как мелких грызунов (таких как полевки и мыши), так и более крупных представителей фауны (таких как лоси, олени, косули, лисы и др.).

Важно отметить, что животный мир в зонах влияния рассматриваемых ЭГС является частью сложных и многокомпонентных экосистем, которые сталкиваются с множеством вызовов. Автомобильные дороги серьезно нарушают жизнь диких животных, изменяя их привычные пути миграции, места обитания и даже поведение. Постоянное движение транспорта создает смертельную опасность, приводя к тому, что многие животные становятся жертвами дорожно-транспортных происшествий (ДТП), особенно в местах пересечения автомагистралей с миграционными путями.

Эта проблема особенно остро стоит для крупных млекопитающих, таких как лоси и олени, столкновения с которыми могут привести к их гибели и к серьезным последствиям для водителей (рис. 12). Согласно статистическим данным [61], наиболее неблагоприятными в отношении ДТП с участием диких копытных животных являются республиканские автомобильные дороги: М6 (Е30) «Минск – Гродно – граница Республики Польша (Брузги)»; М2 «Минск – Национальный аэропорт Минск»; М1 (Е30) «Брест (Козловичи) – Минск – граница Российской Федерации»; М4 «Минск – Могилев»; М5 «Минск – Гомель», М8 (Е95) «Граница Российской Федерации (Езерице) – Витебск – Гомель – граница Украины (Новая Гута)».

Значение сферы автомобильного транспорта в решении социально-экономических проблем Белоруссии

На современном этапе социально-экономического развития Белоруссии наблюдается устойчивый рост значимости автомобильной и дорожной инфраструктуры. Это обуславливает необходимость формирования высокоразвитой транспортной системы и совершенствования сферы обслуживания. Автомобильная отрасль является критически важным элементом современной экономики, поскольку ее эффективность напрямую влияет на производительность других промышленных секторов и, соответственно, на общее экономическое благополучие государства.

Автомобильный транспорт обеспечивает львиную долю грузовых и пассажирских перевозок, выполняет широкий спектр производственных функций и активно используется в международной логистике. Его основные преимущества, такие как высокая маневренность, скорость и возможность осуществления прямых перевозок от отправителя к получателю, делают его незаменимым. Мобильность автотранспорта позволяет оперативно адаптироваться к динамике пассажиро- и грузопотоков.

Роль транспорта не ограничивается лишь перемещением грузов и пассажиров. Он оказывает активное воздействие на весь процесс расширенного воспроизводства, стимулируя экономическое, культурное и социальное развитие общества. Это делает транспортную отрасль одной из базовых в экономике.

Значение автомобильного транспорта в решении социально-экономических проблем Белоруссии подчеркивается существенным ростом автомобилизации. За период с 1997 по 2024 год общее количество автомобилей в стране увеличилось с 1,5 до 3,6 млн, а число личных автомобилей выросло с 1,1 до 3,2 млн, продемонстрировав рост более чем в 2,9 раза. В условиях такой высокой обеспеченности транс-

портными средствами, наличие хорошо развитой транспортной системы становится важным фактором привлечения населения, создает конкурентное преимущество для размещения производственных предприятий и обеспечивает интеграционный эффект.

Развитие транспортной инфраструктуры способствует расширению торговых связей, повышая конкурентоспособность страны и отдельных регионов. Этот процесс, как правило, синхронизируется с общим ростом экономики. Увеличение парка автомобильного транспорта и числа предприятий, обслуживающих его, также ведет к росту потенциальных рабочих мест.

Инвестиции в транспортную инфраструктуру традиционно рассматриваются как стимул для спроса, способствующий экономическому росту и вносящий вклад в развитие регионов, городских и сельских населенных пунктов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все компоненты ЭГС автотранспортного комплекса (как абиотические, так и биотические) обладают совокупностью

специфических характеристик, обусловленных антропогенным воздействием, которые необходимо учитывать при их систематизации, описании и анализе экологических функций литосферы.

Выявленные особенности ЭГС автотранспортного комплекса Белоруссии можно рассматривать как сходные с таковыми для аналогичных ЭГС в России, что необходимо учитывать при инженерно-экологических исследованиях и изысканиях в РФ. **и**

Работа выполнена в рамках: государственной тематики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Эколого-геологические системы: структура, многообразие, систематика и их анализ» (№ ЦИТИС 121042200089-3); научного направления «Закономерности формирования и функционирования эколого-геологических систем», утвержденного приказом ректора Витебского государственного университета имени П.М. Машиерова № 12-н от 17.02.2026.

Список литературы

1. Трофимов В.Т. Эколого-геологическая система, ее типы и положение в структуре экосистемы // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2009. № 2. С. 48–52.
2. Галкин А.Н., Королев В.А. Классификация эколого-геологических систем Беларуси на основе учета особенностей литотопов и инженерно-хозяйственных объектов // Литасфера. 2023. № 1 (58). С. 98–109.
3. Королев В.А., Галкин А.Н. К разработке систематики эколого-геологических систем Белоруссии // Инженерная геология. 2023. Т. 18. № 2. С. 12–28. DOI: <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2023-18-2-12-28>.
4. Королев В.А., Галкин А.Н. Особенности природных эколого-геологических систем массивов глинистых грунтов Белоруссии // ГеоИнфо. 2023. Т. 5, № 9/10. С. 12–21. DOI: [10.58339/2949-0677-2023-5-9/10-12-21](https://doi.org/10.58339/2949-0677-2023-5-9/10-12-21).
5. Королев В.А., Галкин А.Н. Природные эколого-геологические системы массивов песчаных грунтов Белоруссии // Инженерная геология. 2023. Т. 18. № 4. С. 38–49. DOI: <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2023-18-4-38-49>.
6. Королев В.А., Галкин А.Н. Особенности эколого-геологических систем массивов торфяных грунтов Белоруссии // Инженерная геология. 2024. Т. 19. № 1. С. 20–40. DOI: <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2024-19-1-20-40>.
7. Королев В.А., Галкин А.Н. Особенности эколого-геологических систем массивов лёссовых грунтов Белоруссии // ГеоИнфо. 2024. Т. 6, № 1/2. С. 48–62. DOI: [10.58339/2949-0677-2024-6-1/2-48-62](https://doi.org/10.58339/2949-0677-2024-6-1/2-48-62).
8. Королев В.А., Галкин А.Н. Особенности лесохозяйственных эколого-геологических систем Белоруссии // ГеоИнфо. 2024. Т. 6, № 12. С. 6–19. DOI: [10.58339/2949-0677-2024-6-12-6-19](https://doi.org/10.58339/2949-0677-2024-6-12-6-19).
9. Королев В.А., Галкин А.Н. Особенности сельскохозяйственных эколого-геологических систем Белоруссии // Вестник МГТУ. 2025. Т. 28. № 1. С. 49–61.
10. Королев В.А., Галкин А.Н. Особенности горнопромышленных эколого-геологических систем Белоруссии // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2025. № 4. С. 3–24.
11. Королев В.А., Галкин А.Н. Структура и систематика эколого-геологических систем транспортно-коммуникационных комплексов // ГеоИнфо. 2025. Т. 7. № 3. С. 6–17. DOI: [10.58339/2949-0677-2025-7-3-6-17](https://doi.org/10.58339/2949-0677-2025-7-3-6-17).
12. Леонович И.И., Пупейко О.В. Сеть дорог Республики Беларусь как составляющая транспортно-логистической системы // Вестник Белорусского национального технического университета. 2009. № 6. С. 71–81.
13. Витченко А.Н., Антипова Е.А., Гузова О.Н. География. Глобальные проблемы человечества: учебное пособие для 11 класса учреждений общего среднего образования с русским языком обучения (с электронным приложением для повышенного уровня). Минск: Адукацыя і выхаванне, 2021. 247 с.
14. Павлова Е.И. Экология транспорта: учебник. М.: Транспорт, 2000. 248 с.

15. Графкина М.В., Михайлов В.А., Иванов К.С. Экология и экологическая безопасность автомобиля: учебник (2-е изд., испр. и доп.). М.: Форум: Инфра-М, 2024. 320 с.
16. Скобелев В.А., Ларионов М.В. Воздействие объектов автотранспортной инфраструктуры на природную среду и ресурсный потенциал ландшафтных компонентов // International agricultural journal. 2023. № 3. С. 636–646.
17. Никишин В.Н., Барыльникова Е.П. Обеспечение экологической безопасности автотранспортного комплекса: учебное пособие. Набережные Челны, 2019. 232 с.
18. Сайт Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь [электронный ресурс]. URL: <https://mintrans.gov.by/ru/>. Дата последнего обращения: 23.02.2026.
19. Транспортная система Беларуси // Википедия. Свободная энциклопедия [электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Транспортная_система_Беларуси#Автомобильная. Дата последнего обращения: 23.02.2026.
20. Беларусь в цифрах: статистический справочник. Минск: Нац. стат. ком-т Респ. Беларусь, 2025. 63 с.
21. Якубук Ю.П., Луговская И.С. Транспорт и логистика // Белорусская энциклопедия [электронный ресурс]. URL: <https://belarusenc.by/belarus/detail-article.php?ID=9223#auto>. Дата последнего обращения: 01.03.2026.
22. Сайт РУП «Белдорцентр» [электронный ресурс]. URL: <https://beldor.centр.by/2025/03/stata2025/>. Дата последнего обращения: 23.02.2026.
23. СН 3.03.04-2019. Автомобильные дороги. Минск: Минстройархитектуры, 2020. 55 с.
24. Галкин А.Н., Акулевич А.Ф., Павловский А.И., Галезник О.И. Техногенные грунты: учеб. пособие. Минск: Вышэйшая школа, 2020. 192 с.
25. Кидяев Э. Реконструкцию автодороги Р23 «Минск – Микашевичи» планируют завершить в ноябре 2021 года // Soligorsk-news.by [электронный ресурс]. URL: <https://soligorsk-news.by/rekonstrukciju-avtodorogi-r23-minsk-mikashevichi-planirujut-zavershit-v-nojabre-2021-goda/>. Дата последнего обращения: 01.03.2026.
26. Строительство грунтовых дорог // Веб-сайт ООО «Классик-Строй» [электронный ресурс]. URL: <https://ksstroi.ru/gruntovye-dorogi.html>. Дата последнего обращения: 01.03.2026.
27. Ипатов П.П., Строкова Л.А. Общая инженерная геология: учебник. Томск: Томский политех. ун-т, 2012. 365 с.
28. Разрушенную часть дороги в Воложинском районе восстановят к 3 июня // Sputnik.by [электронный ресурс]. URL: <https://sputnik.by/20190530/Razrushennuyu-chast-dorogi-v-Volozhinskom-rayone-vozstanovyat-k-3-iyunya-1041382339.html>. Дата последнего обращения: 02.03.2026.
29. В Гродно из-за ливней обрушилась часть новой дороги. На устранение последствий уйдет около недели // Grodnonews.by [электронный ресурс]. URL: https://grodnonews.by/news/vlast/v_grodno_iz_za_livney_obrushilas_chast_novoy_dorogi_html?ysclid=mlossb97se273318861. Дата последнего обращения: 02.03.2026.
30. Матвеев А.В., Бордон В.Е., Нечипоренко Л.А. Техногенное загрязнение покровных отложений вдоль автомобильных дорог на территории Беларуси // Вучоныя запіскі Брэсцкага ўніверсітэта. 2009. Вып. 5. Ч. 2. Прыродазнаўчыя навукі. С. 110–117.
31. Судник А.В., Новицкий Р.В. Воздействие автомобильных дорог на природно-растительные комплексы и животный мир Беларуси: состояние, реальные и потенциальные угрозы, мониторинг // Современные тенденции и направления строительства, ремонта и содержания автомобильных дорог и искусственных сооружений: матер. респуб. науч.-технич. конф., посвящ. 50-летию РДУП «БелдорНИИ», Минск, 25–26 октября 2012 г. Минск: БелдорНИИ, 2012. С. 223–228.
32. Судник А., Вознячук И., Дубовик Д. Загрязнение придорожных территорий в результате эксплуатации и содержания автомобильных дорог в Беларуси // Наука и инновации. 2023. № 1. С. 72–78. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2023-1-72-78>.
33. Судник А.В., Вознячук И.П. Последствия воздействия загрязнения придорожных территорий компонентами солевых реагентов на экологическое состояние почвы и растений в лесных биогеоценозах // Лесной вестник. 2020. Т. 24, № 6. С. 83–93.
34. Беляев А.Ю. Оценка влияния автозаправочных станций (АЗС) на геологическую среду // Материалы Международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов». Вып. 4. М.: Изд-во МГУ, 2000. С. 178.
35. В Белгидромете рассказали, как изменение климата влияет на экономику Беларуси // Belta.by [электронный ресурс]. URL: <https://belta.by/economics/view/v-belgidromete-rasskazali-kak-izmenenie-klimata-vlijaet-na-ekonomiku-belarusi-586194-2023/>. Дата последнего обращения: 02.03.2026.
36. Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация: учебное пособие (под ред. Г.В. Добровольского). Смоленск: Ойкумена, 2003. 268 с.
37. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследования) (5-е изд., перераб. и доп.). М., 1985. 351 с.
38. Свистова И.Д., Корецкая И.И., Щербаков А.П. Микробиомониторинг автотранспортного загрязнения чернозема в разных типах придорожных экосистем // Вестник ВГУ. Сер.: География, Геоэкология. 2005. № 2. С. 107–114.
39. Щербаков А.П., Свистова И.Д., Джувеликян Х.А. Биомониторинг загрязнения почвы газовыми выбросами автотранспорта // Экология и промышленность России. 2001. № 3. С. 26-29.
40. Марфенина О.Е. Микробиологические аспекты охраны почв. М.: Изд-во МГУ, 1991. 118 с.
41. Жданова Н.Н., Василевская А.И. Меланинсодержащие грибы в экстремальных условиях. Киев: Наукова думка, 1988. 207 с.

42. Мирчинк Т.Г. Почвенная микология. М.: Изд-во МГУ, 1988. 220 с.
43. Билай В.И. Основы общей микологии. Киев: Выща школа, 1989. 392 с.
44. Харитонцев Б.С., Попова Е.И. Особенности видового состава растительности придорожных фитоценозов // Современ. проблемы науки и образования. 2017. № 5. Дата последнего обращения: 02.03.2026. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=26905>.
45. Шавалда Е.С. Таксономический состав и экологическая характеристика придорожной флоры (на примере автомобильных дорог г. Минска и Минской области) // Организмы, популяции и сообщества в трансформирующейся среде: сб. матер. XVII Междунар. науч. экологической конф., Белгород, 22–24 ноября 2022 г. (под ред. Ю.А. Присного). Белгород, 2022. С. 240–243.
46. Шавалда Е.С. Сегетально-рудеральный компонент придорожной растительности на примере автомобильных дорог центральной части Беларуси // Сахаровские чтения 2022 года: экологические проблемы XXI века: матер. 22-й Междунар. науч. конф., Минск, 19–20 мая 2022 г., Междунар. гос. экол. ин-т им. А.Д. Сахарова Бел. гос. ун-та. Минск, 2022. Ч. 2. С. 212–214.
47. Шавалда Е.С., Голованов Я.М. Синтаксономия придорожной растительности города Минска и Минской области (Республика Беларусь) // Фиторазнообразие Восточной Европы. 2024. Т. 18, № 4. С. 234–250.
48. Шавалда Е.С., Судник А.В., Юшин Н.С., Зиньковская И.И. Структура придорожных травянистых сообществ в условиях загрязненности почв тяжелыми металлами // Природные ресурсы. 2024. № 2. С. 68–77.
49. Braun-Blanquet J. Pflanzensociologie: Grundzüge der Vegetationskunde. Wien, N.Y.: Springer-Verlag, 1964. 865 p. (нем.).
50. Миркин Б.М., Наумова Л.Г., Соломещ А.И. Современная наука о растительности: учебник. М.: Логос, 2002. 264 с.
51. Арепьева Л.А., Куликова Е.Я. Эколого-географические особенности синантропной растительности класса *Artemisietea vulgaris* в городах Минск и Курск // Науч. ведомости Белгор. гос. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2016. № 25 (246) С. 31–44.
52. Узаков З.З. Тяжелые металлы и их влияние на растения // Символ науки. 2018. № 1–2. С. 52–53.
53. Давыдова С.Л., Тагасов В.И. Тяжелые металлы как супертоксиканты XXI века: учеб. пособие. М.: Изд-во РУДН, 2002. 140 с.
54. Панасенко Н.Н., Харин А.В., Ивенкова И.М., Куликова Е.Я. Сообщества растений трансформеров: ассоциация *Urtico dioicae-Heracleetum sosnowskyi* // Бюллетень Брянск. отделения Рус. ботан. общества. 2014. Т. 2. № 5. С. 48–53.
55. Косицин А.В., Алексеева-Попова Н.В., Игошина Т.И. Внутривидовая изменчивость металлоустойчивости в некоторых южноуральских популяциях *Aster alpinus* (Asteraceae) // Ботан. журн. 1985. Т. 70, № 8. С. 1084–1091.
56. Демич Ю.А. Содержание тяжелых металлов в объектах окружающей среды и состояние растительных популяций // Вестн. СГУ. 2006. № 7 (47). С. 45–53.
57. Парахонский А.П., Беркун А.В., Ткаченко А.В., Крылов В.П. Содержание токсических веществ в листьях деревьев – экологическая характеристика урбосистемы // Междунар. журн. эксперим. образования. 2011. № 3. С. 110–111.
58. Судник А.В., Яковлев А.П. О последствиях применения в качестве противогололедного реагента хлорида натрия на состоянии насаждений вдоль улиц и дорог в г. Минске // Актуальные проблемы изучения и сохранения фито- и микобиоты: матер. IV Междунар. науч.-практ. конф., приуроченной к 100-летию кафедры ботаники, Минск, 31 мая 2021 г., Биол. фак. БГУ (под ред. В.Н. Тихомирова и др.). Минск, 2021. С. 205–209.
59. Судник А., Вознячук И. О воздействии строительства и содержания автодорог на придорожную растительность // Наука и инновации. 2021. № 11. С. 34–41. DOI: <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2021-11-34-41>.
60. Атака насекомых 2022 – трасса М6 Минск-Гродно (Беларусь) // Pikabu.ru [электронный ресурс]. URL: https://pikabu.ru/story/ataka_nasekomyikh_2022_trassa_m6_minskgrodnobelarus_9164010?ysclid=mm3cqifh7a710635160. Дата последнего обращения: 02.03.2026.
61. Трассы республиканского значения, на которых происходят ДТП с участием диких животных // Belgosohota.by [электронный ресурс]. URL: <https://belgosohota.by/news/trassy-respublikanskogo-znachenija-na-kotoryh-proishodjat-dtp-s-uchastiem-dikih-zhivotnyh>. Дата последнего обращения: 02.03.2026.
62. Редкие кадры: лось выбежал перед авто и перепрыгнул бетонный забор на трассе М6 // Autogrodno.by [электронный ресурс]. URL: <https://autogrodno.by/news/29309-los-m6-pruzhok.html>. Дата последнего обращения: 02.03.2026.

References

1. Trofimov V.T. Ekologo-geologicheskaya sistema, yeyo tipy i polozheniye v strukture ekosistemy [Ecological-geological system, its types and position in the ecosystem structure] // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya. 2009. № 2. S. 48–52 (in Rus.).
2. Galkin A.N., Korolev V.A. Klassifikatsiya ehkologo-geologicheskikh sistem Belarusi na osnove ucheta osobennostei litotopov i inzhenerno-khozyaistvennykh ob"ektov [Classification of ecological-geological systems of Belarus on the basis of the characteristics of lithotopes and engineering-economic facilities] // Litasfera. 2023. № 1 (58). S. 98–109 (in Rus.).

3. Korolev V.A., Galkin A.N. K razrabotke sistematiki ehkologo-geologicheskikh sistem Belorussii [On the development of systematics of ecological-geological systems of Belarus] // *Inzhenernaya geologiya*. 2023. T. 18. № 2. S. 12–28. DOI: <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2023-18-2-12-28> (in Rus.).
4. Korolev V.A., Galkin A.N. Osobennosti prirodnykh ekologo-geologicheskikh si-stem massivov glinistykh gruntov Belorussii [Features of natural ecological-geological systems of clayey soil massifs in Belarus] // *Geoinfo*. 2023. T. 5, № 9/10. S. 12–21. DOI:10.58339/2949-0677-2023-5-9/10-12–21 (in Rus.).
5. Korolev V.A., Galkin A.N. Prirodnyye ekologo-geologicheskiye sistemy massivov peschanykh gruntov Belorussii [Natural ecological-geological systems of sandy soil massifs in Belarus] // *Inzhenernaya geologiya*. 2023. T. 18. № 4. S. 38–49. DOI: <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2023-18-4-38-49> (in Rus.).
6. Korolev V.A., Galkin A.N. Osobennosti ekologo-geologicheskikh sistem massivov torfyanykh gruntov Belorussii [Features of ecological-geological systems of peat soil masses in Belarus] // *Inzhenernaya geologiya*. 2024. T. 19. № 1. S. 20–40. DOI: <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2024-19-1-20-40> (in Rus.).
7. Korolev V.A., Galkin A.N. Osobennosti ekologo-geologicheskikh sistem massivov lessovykh gruntov Belorussii [Features of ecological-geological systems of loess soil massifs in Belarus] // *GeoInfo*. 2024. T. 6, № 1/2. S. 48–62. DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-1/2-48-62 (in Rus.).
8. Korolev V.A., Galkin A.N. Osobennosti lesokhozyaystvennykh ekologo-geologicheskikh sistem Belorussii [Features of forestry ecological-geological systems of Belarus] // *GeoInfo*. 2024. T. 6, № 12. S. 6–19. DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-12-6-19 (in Rus.).
9. Korolev V.A., Galkin A.N. Osobennosti sel'skokhozyaystvennykh ekologo-geologicheskikh sistem Belorussii [Features of agricultural ecological-geological systems of Belarus] // *Vestnik MGTU*. 2025. T. 28, № 1. S. 49–61 (in Rus.).
10. Korolev V.A., Galkin A.N. Osobennosti gornopromyshlennykh ekologo-geologicheskikh sistem Belorussii [Features of mining ecological-geological systems of Belarus] // *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya*. 2025. № 4. S. 3–24 (in Rus.).
11. Korolev V.A., Galkin A.N. Struktura i sistematika ehkologo-geologicheskikh sistem transportno-kommunikatsionnykh kompleksov [Structure and systematics of ecological-geological systems of transport-andcommunication complexes] // *Geoinfo*. 2025. T. 7. № 3. S. 6–17. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-3-6-17 (in Rus.).
12. Leonovich I.I., Pupeyko O.V. Set' dorog Respubliki Belarus' kak sostavlyayushchaya transportno-logisticheskoy sistemy [Road network of the Republic of Belarus as a component of the transport and logistics system] // *Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta*. 2009. № 6. S. 71–81 (in Rus.).
13. Vitchenko A.N., Antipova Ye.A., Guzova O.N. Geografiya. Global'nyye problemy chelovechestva: uchebnoye posobiye dlya 11 klassa uchrezhdeniy obshchego srednego obrazovaniya s russkim yazykom obucheniya (s elektronnyim prilozheniyem dlya povyshennogo urovnya) [Global problems of humanity: a teaching aid for the 11th grade of general secondary education institutions with the Russian language of instruction (with an electronic appendix for an advanced level)]. Minsk: Adukatsyya i vykhavanne, 2021. 247 s. (in Rus.).
14. Pavlova E.I. Ekologiya transporta: uchebnyk [Ecology of Transport: a textbook]. M.: Transport, 2000. 248 s. (in Rus.).
15. Grafkina M.V., Mikhaylov V.A., Ivanov K.S. Ekologiya i ekologicheskaya bez-opasnost' avtomobilya: uchebnyk [Ecology and Environmental Safety of a Vehicle: a textbook]. 2-ye izd., ispr. i dop. M.: Forum: Infra-M, 2024. 320 s. (in Rus.).
16. Skobelev V.A., Larionov M.V. Vozdeystviye ob"yektov avtotransportnoy infra-struktury na prirodnyuyu sredu i resursnyy potentsial landshaftnykh komponentov [Impact of motor transport infrastructure facilities on the natural environment and resource potential of landscape components] // *International agricultural journal*. 2023. № 3. S. 636–646. (in Rus.).
17. Nikishin V.N., Baryl'nikova E.P. Obespecheniye ekologicheskoy bezopasnosti avtotransportnogo kompleksa: uchebnoye posobiye [Ensuring Environmental Safety of the Motor Transport Complex: a textbook]. Naberezhnyye Chelny, 2019. 232 s. (in Rus.).
18. Sait Ministerstva transporta i kommunikatsiy Respubliki Belarus'. URL: <https://mintrans.gov.by/ru>. Data poslednego obrashcheniya: 23.02.2026 (in Rus.).
19. Transportnaya_sistema_Belarusi [Transport system of Belarus] // *Vikipediya. Svobodnaya entsiklopediya [elektronnyi resurs]*. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Transportnaya_sistema_Belarusi#Avtomobil'naya. Data poslednego obrashcheniya: 23.02.2026 (in Rus.).
20. Belarus' v tsifrakh: statisticheskiy spravochnik [Belarus in Figures: statistical handbook]. Minsk: Natsional'nyy statisticheskiy komitet Resp. Belarus', 2025. 63 s. (in Rus.).
21. Yakubuk Yu.P., Lugovskaya I.S. Transport i logistika [Transport and Logistics] // *Belorusskaya entsiklopediya [elektronnyi resurs]*. URL: <https://belarusenc.by/belarus/detail-article.php?ID=9223#railway>. Data poslednego obrashcheniya: 22.01.2026. (in Rus.).
22. Sait RUP «Beldortsentr» [elektronnyi resurs]. URL: <https://beldor.cent.r.by/2025/03/stata2025/>. Data poslednego obrashcheniya: 23.02.2026. (in Rus.).
23. SN 3.03.04-2019. Avtomobil'nyye dorogi [Highways]. Minsk: Minstroyarkhitektury, 2020. 55 s. (in Rus.).
24. Galkin A.N., Akulevich A.F., Pavlovskii A.I., Galeznik O.I. Tekhnogennyye grunty: uchebnoye posobiye [Technogenic Soils: a textbook]. Minsk: Vyshehishaya shkola, 2020. 192 s. (in Rus.).

25. Kidyayev E. Rekonstruktsiyu avtodorogi R23 «Minsk – Mikashevichi» planiruyut za-vershit' v noyabre 2021 goda [Reconstruction of the P23 “Minsk – Mikashevichi” highway is planned to be completed in November 2021] // Soligorsk-news.by [elektronnyy resurs]. URL: <https://soligorsk-news.by/rekonstrukciju-avtodorogi-r23-minsk-mikashevichi-planirujut-zavershit-v-noyabre-2021-goda/>. Data poslednego obrashcheniya: 01.03.2026. (in Rus.).
26. Stroitel'stvo gruntovykh dorog [Construction of unpaved roads] // OOO «Klassik-Stroy» [elektronnyy resurs]. URL: <https://ksstroi.ru/gruntovye-dorogi.html>. Data poslednego ob-rashcheniya: 01.03.2026. (in Rus.).
27. Ipatov P.P., Strokova L.A. Obshchaya inzhenernaya geologiya: uchebnik [General Engineering Geology: a textbook]. Tomsk: Tomskiy politekh. un-t, 2012. 365 s. (in Rus.).
28. Razrushennuyu chast' dorogi v Volozhinskom rayone vosstanovyat k 3 iyunya [The destroyed section of the road in the Volozhin district will be restored by June 3] // Sputnik.by [elektronnyy resurs]. URL: <https://sputnik.by/20190530/Razrushennuyu-chast-dorogi-v-Volozhinskom-rayone-vosstanovyat-k-3-iyunya-1041382339.html>. Data poslednego obrashcheniya: 02.03.2026. (in Rus.).
29. V Grodno iz-za livney obrushilas' chast' novoy dorogi. Na ustraneniye posled-stviy uydet okolo nedeli [In Grodno, part of a new road collapsed due to heavy rains. It will take about a week to repair the damage] // Grodnonews.by [elektronnyy resurs]. URL: https://grodnonews.by/news/vlast/v_grodno_iz_za_livney_obrushilas_chast_novoy_doro-gi_html?ysclid=mlossb97se273318861. Data poslednego obrashcheniya: 02.03.2026 (in Rus.).
30. Matveyev A.V., Bordon V.E., Nechiporenko L.A. Tekhnogennoye zagryazneniye po-krovnykh otlozheniy vdol' avtomobil'nykh dorog na territorii Belarusi [Technogenic pollution of bed deposits along highways in Belarus] // Vuchonnyya zapiski Brestskaga univ'ersiteta. 2009. Vyp. 5. Ch. 2. Pryrodaznachyya navuki. S. 110–117 (in Rus.).
31. Sudnik A.V., Novitskiy R.V. Vozdeystviye avtomobil'nykh dorog na prirodno-rastitel'nyye komplekсы i zhivotnyy mir Belarusi: sostoyaniye, real'nyye i potentsial'nyye ugrozy, monitoring [Impact of highways on natural and plant complexes and fauna of Belarus: status, real and potential threats, monitoring] // Sovremennyye tendentsii i napravleniya stroitel'stva, remon-ta i sodержaniya avtomobil'nykh dorog i iskusstvennykh sooruzheniy: mater. respub. nauch.-tekhnich. konf., posvyashch. 50-letiyu RDUP “BeldorNII”, Minsk, 25–26 okt. 2012 g., BeldorNII. Minsk, 2012. S. 223–228 (in Rus.).
32. Sudnik A., Voznyachuk I., Dubovik D. Zagryazneniye pridorozhnykh territoriy v rezul'tate ekspluatatsii i sodержaniya avtomobil'nykh dorog v Belarusi [Pollution of roadside areas as a result of operation and maintenance of highways in Belarus] // Nauka i innovatsii. 2023. № 1. S. 72–78. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2023-1-72-78> (in Rus.).
33. Sudnik A.V., Voznyachuk I.P. Posledstviya vozdeystviya zagryazneniya pridorozhnykh territoriy komponentami solevykh reagentov na ekologicheskoye sostoyaniye pochvy i rasteniy v lesnykh biogeotsenozakh [Consequences of the impact of roadside pollution by components of salt reagents on the ecological state of soil and plants in forest biogeocenoses] // Lesnoy vestnik. 2020. T. 24, № 6. S. 83–93 (in Rus.).
34. Belyayev A.Yu. Otsenka vliyaniya avtozapravochnykh stantsiy (AZS) na geologicheskuyu sredu [Assessment of the impact of gas stations on the geological environment] // Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii studentov i aspirantov po fun-damental'nyim naukam “Lomonosov”. Vyp. 4. M.: MGU, 2000. S. 178 (in Rus.).
35. V Belgidromete rasskazali, kak izmeneniye klimata vliyayet na ekonomiku Belarusi [In Belhydromet, they explained how climate change affects the economy of Belarus] // Belta.by [elektronnyy resurs]. URL: <https://belta.by/economics/view/v-belgidromete-rasskazali-kak-izmenenie-klimata-vlijaet-na-ekonomiku-belarusi-586194-2023/>. Data poslednego obrashcheniya: 02.03.2026 (in Rus.).
36. Gerasimova M.I., Stroganova M.N., Mozharova N.V., Prokof'yeva T.V. Antropogennyye pochvy: genezis, geografiya, rekul'tivatsiya: uchebnoye posobiye [Anthropogenic Soils: Genesis, Geography, Reclamation: a textbook] / pod red. G.V. Dobrovol'skogo. Smolensk: Oykumena, 2003. 268 s. (in Rus.).
37. Dospekhov B.A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniya) [Methodology of field experiment (with the basics of statistical processing of research results)] (5 ye izd., pererab. i dop.) M., 1985. 351 s. (in Rus.).
38. Svistova I.D., Koretskaya I.I., Shcherbakov A.P. Mikrobiomonitoring avto-transportnogo zagryazneniya chernozema v raznykh tipakh pridorozhnykh ekosistem [Microbiomonitoring of vehicle pollution of chernozem in different types of roadside ecosystems] // Vestnik VGU. Seriya: Geografiya, Geoekologiya. 2005. № 2. S. 107–114 (in Rus.).
39. Shcherbakov A.P., Svistova I.D., Dzhuvelikyan Kh.A. Biomonitoring zagryazneniya pochvy gazovymi vybrosami avtotransporta [Biomonitoring of soil pollution by gas emissions from vehicles] // Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2001. № 3. S. 26-29 (in Rus.).
40. Marfenina O.E. Mikrobiologicheskiye aspekty okhrany pochv [Microbiological Aspects of Soil Protection]. M.: MGU, 1991. 118 s. (in Rus.).
41. Zhdanova N.N., Vasilevskaya A.I. Melaninsoderzhashchiye griby v ekstremal'nykh usloviyakh [Melanin-Containing Fungi in Extreme Conditions]. Kiyev: Naukova dumka, 1988. 207 s. (in Rus.).
42. Mirchink T.G. Pochvennaya mikologiya [Soil Mycology]. M.: MGU, 1988. 220 s. (in Rus.).
43. Bilay V.I. Osnovy obshchey mikologii [Fundamentals of General Mycology]. Kiyev: Vyshcha shkola, 1989. 392 s. (in Rus.).
44. Kharitontsev B.S., Popova E.I. Osobennosti vidovogo sostava rastitel'nosti pridorozhnykh fitotsenozov [Peculiarities of the Species Composition of Vegetation in Roadside Phytocenoses] // Sovrem. problemy nauki i obrazovaniya. 2017. № 5. Data poslednego obrashcheniya: 02.03.2026. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=26905> (in Rus.).

45. Shavalda E.S. Taksonomicheskiy sostav i ekologicheskaya kharakteristika pri-dorozhnoy flory (na primere avtomobil'nykh dorog g. Minska i Minskoy oblasti) [Taxonomic composition and ecological characteristics of roadside flora (using the roads of Minsk and the Minsk region as an example)] // Organizmy, populyatsii i soobshchestva v transformiruyushcheyse sredy: sbornik mater. XVII Mezhdunar. nauch. ekologicheskoy konf., Belgorod, 22–24 noyabrya 2022 g. (Pod red. Yu.A. Prisnogo). Belgorod, 2022. S. 240–243. (in Rus.).
46. Shavalda E.S. Segetal'no-ruderal'nyy komponent pridorozhnoy rastitel'nosti na primere avtomobil'nykh dorog tsentral'noy chasti Belarusi [Segetal-ruderal component of roadside vegetation using the roads of the central part of Belarus as an example] // Sakharovskiye chteniya 2022 goda: ekologicheskiye problemy XXI veka: mater. 22-y Mezhdunar. nauch. konf., Minsk, 19–20 maya 2022 g.: Mezhdunar. gos. ekol. institut imeni A.D. Sakharova Bel. gos. un-ta. Minsk, 2022. Ch. 2. S. 212–214 (in Rus.).
47. Shavalda E.S., Golovanov Ya.M. Sintaksonomiya pridorozhnoy rastitel'nosti goroda Minska i Minskoy oblasti (Respublika Belarus') [Syntaxonomy of Roadside Vegetation of Minsk and Minsk Region (Republic of Belarus)] // Fitoraznoobrazniye Vostochnoy Evropy. 2024. T. 18. № 4. S. 234–250 (in Rus.).
48. Shavalda E.S., Sudnik A.V., Yushin N.S., Zin'kovskaya I.I. Struktura pridorozhnykh travyanistykh soobshchestv v usloviyakh zagryaznenosti pochv tyazhelymi metallami [Structure of roadside grassy communities under conditions of soil pollution with heavy metals] // Prirodnyye resursy. 2024. № 2. S. 68–77 (in Rus.).
49. Braun-Blanquet J. Pflanzensociologie: Grundzüge der Vegetationskunde. Wien; N.Y.: Springer-Verlag, 1964. 865 p. (in German)
50. Mirkin B.M., Naumova L.G., Solomeshch A.I. Sovremennaya nauka o rastitel'nosti: uchebnik [Modern Science of Vegetation: a textbook]. M.: Logos, 2002. 264 s. (in Rus.).
51. Arep'yeva L.A., Kulikova Ye.Ya. Ekologo-geograficheskiye osobennosti sinantropnoy rastitel'nosti klassa Artemisietea vulgaris v gorodakh Minsk i Kursk [Ecological-geographical features of synanthropic vegetation of the class Artemisietea Vulgaris in the cities of Minsk and Kursk] // Nauchnye vedomosti Belgor. gos. un-ta. Ser.: Yestestv. nauki. 2016. № 25 (246) S. 31–44 (in Rus.).
52. Uzakov Z.Z. Tyazhelyye metally i ikh vliyaniye na rasteniya [Heavy metals and their impact on plants] // Simvol nauki. 2018. № 1–2. S. 52–53 (in Rus.).
53. Davydova C.L., Tagasov V.I. Tyazhelyye metally kak supertoksikanty XXI veka: ucheb. posobiye [Heavy Metals as Supertoxicants of the 21st Century: a textbook]. M.: Izd-vo RUDN, 2002. 140 s. (in Rus.).
54. Panasenko N.N., Kharin A.V., Ivenkova I.M., Kulikova E.Ya. Soobshchestva rasteniy transformerov: assotsiatsiya Urtico dioicae-Heracleetum sosnowskyi [Transformer plant communities: Urtico dioicae-Heracleetum sosnowskyi association] // Byulleten' Bryansk. otdeleniya Rus. botan. obschestva. 2014. T. 2. №5. S. 48–53 (in Rus.).
55. Kositsin A.V., Alekseyeva-Popova N.V., Igoshina T.I. Vnutripopulyatsionnaya izmenchivost' metalloustoychivosti v nekotorykh yuzhnoural'skikh populyatsiyakh Aster alpinus (Asteraceae) [Intrapopulation variability of metal tolerance in some South Ural populations of Aster alpinus (Asteraceae)] // Botan. zhurnal. 1985. T. 70. № 8. S. 1084–1091 (in Rus.).
56. Demich Yu.A. Soderzhaniye tyazhelykh metallov v ob"yektakh okruzhayushchey sredy i sostoyaniye rastitel'nykh populyatsiy [Content of heavy metals in environmental objects and the state of plant populations] // Vestnik SGU. 2006. № 7 (47). S. 45–53 (in Rus.).
57. Parakhonskiy A.P., Berkun A.V., Tkachenko A.V., Krylov V.P. Soderzhaniye toksicheskikh veshchestv v list'yakh derev'yev – ekologicheskaya kharakteristika urbosistemy [Content of toxic substances in tree leaves – ecological characteristics of the urban system] // Mezhdunar. zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya. 2011. № 3. S. 110–111 (in Rus.).
58. Sudnik A.V., Yakovlev A.P. O posledstviyakh primeneniya v kachestve protivogolodnogo reagenta khlorida natriya na sostoyaniye nasazhdeniy vdol' ulits i dorog v g. Minske [On the consequences of using sodium chloride as an anti-icing reagent on the condition of plantings along streets and roads in Minsk] // Aktual'nyye problemy izucheniya i sokhraneniya fito- i mikrobioty: mater. IV mezhdunar. nauch.-prakt. konf., priurochennoy k 100-letiyu kafedry botaniki, Minsk, 31 maya 2021 g., Biol. fak. BGU (pod red. V.N. Tikhomirova i dr.). Minsk, 2021. S. 205–209 (in Rus.).
59. Sudnik A., Voznyachuk I. O vozdeystvii stroitel'stva i soderzhaniya avtodorog na pridorozhnyuyu rastitel'nost' [On the impact of road construction and maintenance on roadside vegetation] // Nauka i innovatsii. 2021. № 11. S. 34–41. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2021-11-34-41> (in Rus.).
60. Ataka nasekomykh 2022 – trassa M6 “Minsk – Grodno” (Belarus') [Insect Attack 2022 – M6 “Minsk-Grodno” Highway (Belarus)] // Pikabu.ru [elektronnyi resurs]. URL: https://pikabu.ru/story/ataka_nasekomyikh_2022_trassa_m6_minskgrodno_belarus_9164010?ysclid=mm3cqjfh7a710635160. Data poslednego obrashcheniya: 02.03.2026. (in Rus.).
61. Trassy respublikanskogo znacheniya, na kotorykh proiskhodyat DTP s uchastiyem dikikh zhitovnykh [Highways of national significance where accidents involving wild animals occur] // Belgosohota.by [elektronnyi resurs]. URL: <https://belgosohota.by/news/trassy-respublikanskogo-znachenija-na-kotoryh-proishodjat-dtp-s-uchastiem-dikih-zhitovnyh>. Data poslednego obrashcheniya: 02.03.2026 (in Rus.).
62. Redkiye kadry: los' vybezhal pered avto i pereprygnul betonnyy zabor na trasse M6 [Rare footage: a moose runs out in front of a car and jumps over a concrete fence on the M6 highway] // Autogrodno.by [elektronnyi resurs]. URL: <https://autogrodno.by/news/29309-los-m6-pruzhok.html>. Data poslednego obrashcheniya: 02.03.2026 (in Rus.).