



# ОСОБЕННОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ БЕЛОРУССИИ

Принята к публикации 17.04.2025

Опубликована 18.08.2025

## КОРОЛЁВ В.А.

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

## 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

В статье проанализированы структура и характерные особенности промышленных эколого-геологических систем (ЭГС), существующих на территории Белоруссии. Показано, что рассмотренные ЭГС являются широко распространенными в республике антропогенными эколого-геологическими системами, играющими важную роль в экосистемах страны. Каждая из них обладает своей специфической структурой, отражающей влияние различных техногенных факторов на ее абиотические (литотоп, гидротоп, эдафотоп) и биотические (микробоценоз, фитоценоз, зооценоз, социум) компоненты. Все компоненты этих промышленных ЭГС (как абиотические, так и биотические) обладают своими комплексами особых характеристик, обусловленных влиянием хозяйственной деятельности человека, техногенной трансформацией соответствующих компонентов природных экосистем и созданием новых искусственных эколого-геологических систем, что необходимо учитывать при систематике ЭГС, описании и анализе экологических функций литосферы. Описаны характерные черты разных типов промышленных ЭГС (производственных и складских как наиболее распространенных в стране). Выявленные закономерности и особенности можно рассматривать как общие для промышленных ЭГС Белоруссии и для аналогичных ЭГС в России. Их необходимо учитывать при инженерно-экологических исследованиях и изысканиях.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

эколого-геологическая система (ЭГС); антропогенная промышленная ЭГС; технолитотоп; технозадафотоп; техномикробоценоз; технофитоценоз; зооценоз; Белоруссия.

## ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Королёв В.А., Галкин А.Н. Особенности промышленных эколого-геологических систем Белоруссии // ГеоИнфо. 2025. Т. 7. № 2. С. 38–55.  
DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-2-38-55.

# FEATURES OF INDUSTRIAL ECOLOGICAL-GEOLOGICAL SYSTEMS OF BELARUS

Accepted for publication 17.04.2025

Published 18.08.2025

## KOROLEV V.A.

DSc, professor at the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
va-korolev@bk.ru

## GALKIN A.N.

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

## ABSTRACT

The article analyzes the structure and characteristic features of industrial ecological-geological systems (EGS) existing in Belarus. It is shown that the considered EGS are anthropogenic ecological-geological systems that are widespread in the republic and play an important role in the ecosystems there. Each of those EGS has its own specific structure reflecting the influence of various technogenic factors on its abiotic (the lithotope, hydrotope, edaphotope) and biotic (the microbocenosis, phytocenosis, zoocenosis, society) components. All the components of those industrial EGS (both abiotic and biotic ones) have their own sets of special characteristics caused by the influence of human industrial-economic activity, by the technogenic transformation of the corresponding components of natural ecosystems, and by the creation of new artificial ecological-geological systems, that should be taken into account when systematizing EGS, describing and analyzing the ecological functions of the lithosphere. The characteristic features of different types of industrial EGS (production and warehouse ones as the most widespread in the republic) are described. The identified patterns and features can be considered as common for industrial EGS in Belarus and similar EGS in Russia. They should be taken into account when performing geo-environmental studies and site investigations.

## KEYWORDS:

**ecological-geological system (EGS); anthropogenic industrial EGS; technolithotope; technoedaphotope; technomicrocenosis; technophytocenosis; zoocenosis; Belarus**

## FOR CITATION:

**Korolev V.A., Galkin A.N. Osobennosti promyshlennykh ekologo-geologicheskikh sistem Belorusii [Features of industrial ecological-geological systems of Belarus]// GeoInfo. 2025. T. 7. № 2. S. 38–55. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-2-38-55 (in Rus.).**

## ВВЕДЕНИЕ ►

В экологической геологии и геоэкологии центральное место занимает понятие «эколого-геологическая система» (ЭГС). Структура и классификация ЭГС, 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 антропогенные). Природные и некоторые техногенные ЭГС изучены достаточно хорошо: определена их систематика и описаны абиотические (литотоп, гидротоп, эдафотоп) и биотические (микробоценоз, фитоценоз, зооценоз) компоненты [2–9]. Однако искусственные ЭГС на территории республики исследованы пока недостаточно.

Как мы указывали в своих более ранних публикациях [2, 3], в Белоруссии

выделяют шесть классов антропогенных эколого-геологических систем – горно-промышленные, промышленные, оборонно-промышленные, селитебные, транспортно-коммуникационные и агрономические ЭГС. Они подразделяются на восемнадцать видов (например, шахтно-отвальные, карьерно-отвальные, нефтегазопромышленные, производственные, складские, дорожные, жилые, тепличные, земледельческие и другие ЭГС). Особое место среди них занимают промышленные эколого-геологические системы.

С функциональной точки зрения промышленная ЭГС представляет собой систему, включающую в себя тесно взаимосвязанные промышленное звено, или подсистему (где производится «чистая» промышленная продукция и продукция в виде отходов), и модифицированные в соответствии с определенной технологией природные

комплексы, представленные в виде природно-хозяйственных единиц определенной территории.

Эколого-геологические характеристики, структура и специфические черты промышленных ЭГС обладают особенностями, значительно отличающимися от соответствующих особенностей других эколого-геологических систем и до сих пор остаются недостаточно исследованными. В связи с этим на основе ранее разработанной нами классификации ЭГС территории Белоруссии [2, 3] в данной статье предпринята попытка представить общее описание промышленных эколого-геологических систем, а также выявить и охарактеризовать особенности их абиотических (литотоп, гидротоп, эдафотоп) и биотических (микробоценоз, фитоценоз, зооценоз) компонентов. Это стало основными целью и задачами настоящего исследования.



Рис. 1. Структура промышленной ЭГС

## ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭГС ►

В промышленных ЭГС основную роль играют техногенные источники воздействий, специфика которых обусловлена типами этих воздействий, которые, в свою очередь, связаны с теми или иными инженерно-хозяйственными объектами отраслей промышленности (техническими подсистемами ЭГС).

Системы данного класса отличаются высокой долей техногенно преобразованных экологических свойств литосферы. Это связано с глубокими физическими (механическими, термическими, электрическими и др.), химическими и физико-химическими преобразованиями всех ее компонентов – грунтов, подземных вод, газов и органических веществ.

Для промышленной ЭГС характерно формирование индустриального микрорельефа и микроклимата, которые становятся отличными от таковых для природных ЭГС на той же территории. В этих местах наблюдается активное загрязнение атмосферы, проявляющееся в виде смогов, инверсий загрязняющих веществ и в образовании тепловых по-душек над промышленными предприятиями. В спектре загрязняющих эле-

ментов доминируют компоненты, относящиеся к ведущих классам опасности.

Регулирование поверхностного стока на техногенно освоенных территориях путем строительства водохранилищ приводит к деградации и отмиранию рек, интенсивному их загрязнению, подтоплению территорий.

Кроме того, ЭГС рассматриваемого класса отличаются максимальной деградацией почв как по количественным, так и по качественным показателям. Хроническое ухудшение свойств почв и разрушение их структуры происходят в результате как прямого загрязнения, так и консервации почв на фоне массового асфальтирования.

Серьезное негативное воздействие на экологические характеристики литосферы промышленных ЭГС оказывают отстойники и накопители опасных отходов. Технологические процессы, связанные с этими отходами, как правило, идут открыто и активно взаимодействуют с грунтовыми и поверхностными водами. Подземные захоронения высокотоксичных отходов, образующихся в ходе промышленной деятельности, создают объекты повышенной экологической опасности на глубине до 2–3 км.

Высокий уровень техногенного преобразования компонентов приповерх-

ностной части литосферы в целом создает неблагоприятные эколого-геологические условия в районах расположения промышленных объектов. В результате наблюдается снижение продуктивности экосистем и возникновение мутационных процессов в биосфере, что приводит к устойчивому ухудшению условий обитания в экосистемах более высоких порядков [10].

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И КОМПОНЕНТОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭГС ►

### Особенности структуры промышленных ЭГС ►

Общая структура промышленных эколого-геологических систем показана на рисунке 1. Для них характерны те же основные структурные компоненты (подсистемы), что и для иных техногенных ЭГС, – как абиотические (литотоп, гидротоп, атмотоп, технические сооружения), так и биотические (эдафотоп, микробоценоз, фитоценоз, зооценоз). Но эти компоненты являются техногенно измененными, или искусственными (антропогенными), из-за влияния социума и создаваемых им технических сооружений.

Кроме того, в отличие от прочих техногенных ЭГС, в промышленных эко-

**Таблица. Основные отрасли промышленности Белоруссии и технические подсистемы соответствующих ЭГС**

Отрасль промышленности	Продукция	Технические сооружения (подсистемы ЭГС)	
		производственные	складские
Металлургическая	Черные металлы, цветные металлы	Металлургические заводы	Склады готовой продукции; отвалы металлургических шлаков
Химическая	Минеральные удобрения; продукты нефтехимии; продукты переработки газа; химические волокна; пластмассы; бытовая химия; резинотехнические изделия и др.	Заводы по производству удобрений; нефтехимические предприятия; газоперерабатывающие заводы; химические и фармацевтические фабрики	Склады готовой продукции; отвалы фосфогипса; шламонакопители; полигоны ТПО
Энергетическая	Электрическая энергия; тепловая энергия	ТЭС; ТЭЦ; АЭС; ГАЭС	Отвалы золы, образовавшейся при сжигании угля, торфа, сланцев
Машиностроительная	Автомобили; сельскохозяйственные машины; бытовая техника; станки; электронная техника	Автомобильные, тракторные, станкостроительные, электротехнические заводы и фабрики; заводы бытовой техники и приборостроения	Склады готовой продукции; полигоны ТПО
Лёгкая	Ткани, одежда, обувь и др.	Текстильные, швейные, обувные и др. фабрики	Склады готовой продукции; полигоны ТПО
Пищевая	Мясомолочная, рыбная, хлебобулочная, кондитерская, масложировая, сахарная, табачная, алкогольная продукция; поваренная соль	Фабрики и др. предприятия пищевой промышленности (по видам продукции)	Склады готовой продукции; полигоны ТПО; отвалы лигнина; полигоны ТКО
Лесная и деревообрабатывающая	Древесина; пиломатериалы; древесно-волокнистые, древесно-стружечные и др. плиты; мебель	Деревообрабатывающие, мебельные фабрики	Склады готовой продукции; полигоны ТПО
Целлюлозно-бумажная	Целлюлоза; картон; бумага	Целлюлозно-бумажные, целлюлозно-картонные комбинаты	Склады готовой продукции; полигоны ТПО
Строительных материалов	Цемент; стройматериалы; стекло; фарфор	Цементные, стекольные, фарфоровые заводы; заводы других стройматериалов	Склады готовой продукции; полигоны ТПО

Примечание: ЭГС – эколого-геологические системы; ТЭС – тепловая электростанция; ТЭЦ – тепловая электроподстанция; АЭС – атомная электростанция; ГАЭС – гидроаккумулирующая электростанция; ТПО – твердые промышленные отходы; ТКО – твердые коммунальные отходы.

лого-геологических системах ведущую роль играют их технические подсистемы – промышленные сооружения ( заводы, фабрики, комбинаты, производственные комплексы и др.) с соответствующей инфраструктурой (административными и служебными зданиями, путепроводами, продуктопроводами, линиями электропередачи, трубопроводами и др.). Именно они являются основным фактором воздействия на биотические компоненты промышленных ЭГС и определяют облик таких систем.

Промышленные ЭГС, еще не так давно тяготевшие к урбанизированным территориям, теперь все чаще выводятся за их пределы. Все больше встречаются крупных заводских комплексов, в

которых управлению службы, складские и вспомогательные хозяйства сосредоточены вокруг территории базового производства.

В зависимости от особенностей хозяйственной деятельности в рассматриваемом классе выделяются такие виды ЭГС, как *производственные* и *складские* [11]. Из них на территории Белоруссии наиболее распространены *производственные* ЭГС, отличающиеся многообразием технических объектов, каждый из которых имеет свое определенное функциональное назначение и свой набор инженерных сооружений. Среди таких объектов можно выделить предприятия машиностроительной, энергетической, металлургической, ме-

таллообрабатывающей, химической, нефтехимической, легкой, пищевой, деревообрабатывающей, целлюлозно-бумажной промышленности, промышленности строительных материалов и других отраслей (таблица, рис. 2). Такое многообразие предприятий (технических подсистем ЭГС) в значительной степени определяет характер воздействий на геологическую составляющую той или иной ЭГС и окружающую среду в целом. Это обусловлено тем, что многие производственные объекты способны оказывать воздействия не только на приповерхностные горизонты массивов грунтов (литотопы), имеющие повсеместное распространение и служащие основаниями фундаментов большинства



Рис. 2. Белорусский металлургический завод – не просто завод, а настоящий город [12]



Рис. 3. Отвалы шлака Белорусского металлургического завода [17]

производственных зданий и сооружений, но и на более глубокие горизонты литосферы, а также на гидротоп и атмосферу (приповерхностную атмосферу).

*Складская подсистема промышленных ЭГС* (см. таблицу) объединяет различного рода складские, технопарковые сооружения, крупные промышленные шламонакопители и шламоотвалы, а также полигоны и свалки твердых промышленных отходов (ТПО).

Наиболее остро в республике стоит проблема создания и эксплуатации полигонов для захоронения ТПО и осадков промышленных сточных вод (ОПСВ). Ежегодно в стране образуется не менее 20 млн. т твердых отходов производства и потребления. Из них, например, в 2020 году: около 56% составили отходы минерального происхождения; более 24% – отходы растительного и животного происхождения; 4,3% – отходы жизнедеятельности населения и подобные им отходы промышленности; 4,4% – отходы химических и связанных

с ними производств; 10,9% – отходы (осадки) водоподготовки котельно-теплового хозяйства и питьевой воды, очистки сточных, дождевых вод и использования воды на электростанциях; чуть более 0,1% – медицинские отходы [13]. Для размещения ТПО в Белоруссии используется 80 полигонов, занимающих 740 га земли [14].

Кроме того, значительный объем (30–35%) промышленных отходов, включая отходы, подобные бытовым, и некоторые специфические их виды (инертные и третьего и четвертого классов опасности), направляется на полигоны твердых коммунальных отходов (ТКО), что может создавать дополнительную нагрузку на эти объекты [11].

Промышленные отходы весьма разнообразны по составу и происхождению. Их номенклатура включает около 800 наименований. Большая доля приходится на отходы минерального происхождения (формовочную горячую землю литейных производств, фосфо-

гипс), а также на органические отходы производства пищевых продуктов и вкусовых добавок, на гидролизный лигнин и промышленный мусор [15].

На долю других видов промышленных отходов, наиболее разнообразных по составу, приходится не более 10%. Эта группа объединяет отходы, содержащие вещества всех классов опасности, образующиеся в относительно небольших количествах на предприятиях различных отраслей, что затрудняет возможность их селективного сбора и переработки. На предприятиях машиностроительного и химического профилей образуется большое количество шламов, в том числе гальванических (одного из наиболее опасных видов отходов). При работе лакокрасочных, электротехнических, швейно-трикотажных заводов и фабрик накапливаются отходы производства красок, лаков, эмаэй, в том числе отработанные растворители. Среди отходов легкой промышленности выделяются отходы кожевенного производства [11].

Ежегодный уровень утилизации производственных отходов в стране варьирует в широких пределах. Например, в 2019–2022 годах он составлял от 84,9 до 102,4% (в среднем – 92,9%), включая утилизацию ранее накопленных отходов. Однако этот показатель существенно различается для разных типов отходов. Самые высокие уровни переработки относятся к отходам формовочных и стержневых смесей (100 и 99,4% соответственно). Высокие показатели утилизации также демонстрируют окалина (97,3%) и следующие отходы: известковые (98,7%), бетонные (93,6%), пластиковые (93,2%), текстильные и химических волокон (94,5%). Достаточно эффективно утилизируются отходы растительного и животного происхождения (97,2%) – в основном за счет переработки отходов пищевой промышленности, деревообработки, а также бумажных и картонных отходов [16].

К отходам, которые не имеют активного применения или используются в минимальных объемах, относятся: золы и шлаки, образующиеся в котельных, при сжигании отходов, при работе литьевых цехов (рис. 3); отработанные шлифовальные и полировальные материалы; минеральные остатки, получаемые в процессе газоочистки; асбестосодержащие материалы; загрязненный песок; шиферный лом и др. Неиспользованные отходы вывозятся на объекты захоронения или накапливаются на территориях предприятий (рис. 4). Среди

вывозимых на захоронение преобладают отходы производства, подобные отходам жизнедеятельности населения, включая отходы от уборки территорий промышленных предприятий, а также отходы минерального происхождения (такие как отходы, возникающие при работе литейно-фасонных цехов; отдельные виды строительных отходов; лом огнеупорных изделий; отходы сухой уборки гаражей, автостоянок, мест парковки транспорта; минеральные шламы и др.) [15].

## ОСОБЕННОСТИ АБИОТИЧЕСКИХ И БИОКОСНЫХ КОМПОНЕНТОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭГС ►

### Технолитотопы

Технолитотопы промышленных ЭГС представлены массивами грунтов различного состава и генезиса (песчаных, глинистых, песчано-глинистых, мергельно-меловых, искусственных и др.), которые либо служат вмещающей средой, либо являются *техногенными грунтами*. К последним относятся *естественные грунты, измененные и перемещенные в результате производственной и хозяйственной деятельности человека, и антропогенные геологические образования. Под антропогенными образованиями понимают твердые отходы производственной и хозяйственной деятельности человека, в результате которой произошли коренные изменения состава, структуры и текстуры природного минерального и органического сырья (компонентов геологической среды)* [17].

По уровню техногенного преобразования литотопа промышленные эколого-геологические системы нередко сопоставимы с горнопромышленными ЭГС. Это выражается в изменениях строения, состава и свойств грунтов, рельефа, гидрогеологических условий. К примеру, при строительстве некоторых зданий и сооружений производственных ЭГС в основаниях их фундаментов происходит уплотнение грунтов, иногда грунты оснований искусственно упрочняются методами технической мелиорации. Действие динамических нагрузок нередко, напротив, вызывает разуплотнение грунтовых массивов. В местах размещения горячих цехов ряда производств фиксируется разогрев грунтов в той или иной степени. В результате утечек технологических и других сточных вод повышается уровень грунтовых вод, происходит засоление



Рис. 4. Отвалы фосфогипса Гомельского химического завода [18]

грунтов и загрязнение подземных вод. Например, анализ состава подземных вод на территории 29 предприятий страны [19] показал, что на всех этих объектах подземные воды подверглись загрязнению, преимущественно азотистыми соединениями и фенолами, а в зонах влияния отдельных предприятий высоких концентраций в них достигали ртуть, кадмий и свинец.

Следует отметить, что состав загрязнений подземных вод весьма разнообразен и определяется главным образом характером производства и перечнем веществ, использующихся или образующихся при технологических процессах. Например: на предприятиях машиностроения и металлообработки это нефтепродукты, тяжелые металлы; на предприятиях пищевой промышленности – органические вещества, хлориды и т.д. [20]. Зоны техногенного влияния в производственных ЭГС распространяются на глубину в десятки метров и часто охватывают эксплуатируемые водоносные горизонты [21].

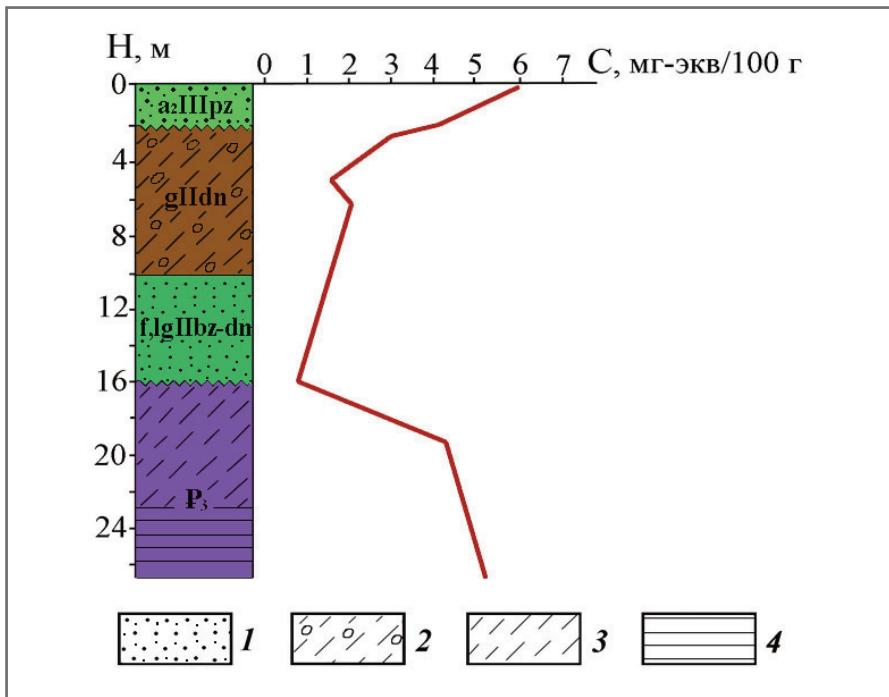
Изменения, происходящие в различных компонентах геологической составляющей рассматриваемых ЭГС, нередко приводят к активизации геологических и возникновению инженерно-геологических процессов, среди которых можно отметить суффозию, подтопление, заболачивание и др. [22].

Как и для производственных эколого-геологических систем, многообразие технических объектов складских ЭГС в значительной степени определяет характер строения и состояния их литотопов. Причем изменение литотопа нередко сопровождается формированием литохимических и гидрогеохимических полигементных аномалий, характеризующихся широкой ассоциацией эле-

ментов-загрязнителей, в составе которых преобладают наиболее опасные технофильные элементы [11]. К примеру, на участке размещения шламонакопителей и полей фильтрации Гродненского ОАО «Азот» грунтовые воды загрязнены сульфатами ( $1700 \text{ мг}/\text{дм}^3$ ), нитратами ( $182 \text{ мг}/\text{дм}^3$ ), нитритами ( $3,0 \text{ мг}/\text{дм}^3$ ), аммонием ( $60 \text{ мг}/\text{дм}^3$ ) [14]. Под отвалами фосфогипса и под шламонакопителями Гомельского химического завода подземные воды загрязнены фосфатами (до 7 предельно допустимых концентраций (ПДК)), фтором (до 48 ПДК), сульфатами (до 14 ПДК) и другими компонентами. Причем загрязнение отмечено и в глубокозалегающем (30–35 м) палеогеновом водоносном горизонте [21]. На полигоне ТПО Бобруйского завода биотехнологий, где ежегодно складируется более 46 тыс. т лигнинных отходов, в подземных водах на глубине 45 м обнаружено высокое содержание ионов  $Mg^{2+}$  ( $77 \text{ мг}/\text{дм}^3$ ),  $Pb^{2+}$  ( $0,11 \text{ мг}/\text{дм}^3$ ),  $Fe^{2+}$  ( $3,6 \text{ мг}/\text{дм}^3$ ),  $Zn^{2+}$  ( $12,5 \text{ мг}/\text{дм}^3$ ) [23].

Такая же ситуация наблюдается и в отношении грунтов. Перечень основных веществ, загрязняющих грунты, включает тяжелые металлы, нефтепродукты, водорастворимые соединения – нитраты, сульфаты, хлориды и др. (рис. 5). По обобщенным данным, в Белоруссии только в зонах влияния полигонов ТПО площадь территорий с опасным уровнем загрязнения почв и других грунтов зоны аэрации оценивается в 1,02 тыс. га [11].

При функционировании складских ЭГС помимо загрязнения компонентов геологической подсистемы часто происходит уплотнение и разогрев грунтов, повышается уровень грунтовых вод, что нередко приводит к подтоплению и за-



**Рис. 5.** Распределение концентраций ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  в разрезе поверхностных отложений на участке размещения отвалов фосфогипса Гомельского химзавода. Стратиграфия и генетические типы отложений:  $P_3$  – олигоценовые морские отложения; f,lgIIbz-dn – березинско-днепровский водно-ледниковый комплекс; gIIdn – днепровская морена; a2IIIprz – поозерский аллювий вторых надпойменных террас. Остальные обозначения:  $H$  – глубина;  $C$  – концентрация; 1 – песок разнозернистый; 2 – супесь валунно-галечная (моренная); 3 – супесь пылеватая; 4 – глина (по [11] с изменениями)

болачиванию участков размещения самих ЭГС и прилегающих к ним территорий (см. рис. 4).

Зона техногенного влияния в складских эколого-геологических системах, как и в производственных, может распространяться на глубину в несколько десятков метров и охватывать эксплуатируемые водоносные горизонты.

Отдельного внимания при характеристике литотопов промышленных ЭГС заслуживают *massивы техногенных грунтов*, возникающих на основе отходов различных отраслей производства, которые становятся компонентами геологической среды, характеризуются большими объемами и занимают значительные площади. К таким массивам относятся отвалы сталеплавильных шлаков Белорусского металлургического завода (БМЗ) в Жлобине, фосфогипса Гомельского химического завода (ГХЗ), лигнина Бобруйского завода биотехнологий.

В настоящее время в отвалах БМЗ накопилось свыше 4,5 млн т *сталеплавильных шлаков*. Ежегодно к ним добавляется примерно по 700 тыс. т. В химическом составе этих шлаков присутствуют (масс. %): кислород (41,4), кальций (19,3), железо (14,6), углерод (8,0), кремний (7,4), марганец (3,2), алюминий (2,6), магний (1,4), кадмий (0,6).

В небольших количествах (менее 1%) в них также содержатся тяжелые металлы: кадмий, цинк, свинец, медь [24].

При естественном охлаждении эти шлаки представляют собой кристаллические камнеподобные образования (см. рис. 3). При охлаждении и затвердевании в них образуются минералы, среди которых преобладают силикаты, присутствуют алюминаты, алюмосиликаты и сульфиды. Их основной фазовой составляющей является двукальциевый силикат ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ).

При остывании и длительном хранении в отвалах шлаки подвергаются физическому и химическому выветриванию. Их физическое выветривание приводит к образованию крупно- и мелкообломочных материалов. Химическое выветривание шлаков и скорость протекающих в них процессов определяются их составом.

Для шлаков БМЗ характерны четыре вида распада: известковистый, магнезиальный, марганцевый и железистый.

Известковистый и магнезиальный распады шлаков связаны с гидратацией включений свободных оксидов кальция и магния при воздействии атмосферных осадков и колебаний температуры воздуха. Это приводит к увеличению объема («набуханию») шлаков на 18–20%.

Продолжительность указанных процессов зависит от состава шлаков, их прочности, устойчивости структуры, условий гидратации и может колебаться от 2–3 месяцев до 10–12 лет.

Марганцевый и железистый распады происходят в результате взаимодействия закисей марганца и железа с сульфидной серой и образования сульфидов этих металлов, которые во влажной среде переходят в гидраты. Это сопровождается увеличением объема соответственно на 24 и 38%. В результате химического преобразования исходного шлака образуются новые минералы, такие как гидросиликаты, гидроалюминаты, гидроферриты, портландит, брусит, карбонаты и др. [17].

В соответствии с ГОСТ 25100–2011 [25] сталеплавильные шлаки являются щебенистыми грунтами (содержание в них частиц размером более 10 мм превышает 50%). В куске они обладают достаточно высокой прочностью, характерной для скальных грунтов природного происхождения. Их свойства зависят от структурно-текстурных особенностей. В массиве шлаки хорошо поддаются уплотнению, приобретая при этом высокую прочность и малую сжимаемость [17].

Отвалы фосфогипса в Белоруссии начали формироваться с 1969 года, когда ГМЗ освоил выпуск фосфорных удобрений на основе апатитовых концентратов (с 2008 года – с добавлением фосфоритовых концентратов). За более чем полувековой срок накопилось свыше 22 млн т фосфогипса на площади 89 га (см. рис. 4). Ежегодно к этому прибавляется более 350 тыс. т [17].

В пересчете на сухое вещество фосфогипс на 97% состоит из сульфата кальция ( $\text{CaSO}_4$ ). В его химический состав входят также  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{SiO}_2$ . В зависимости от температуры и концентрации получаемой экстракционной фосфорной кислоты сульфат кальция может образовываться в формах дигидрата ( $\text{CaSO}_4\cdot2\text{H}_2\text{O}$ ), полугидрата ( $\text{CaSO}_4\cdot0,5\text{H}_2\text{O}$ ) или безводной соли ( $\text{CaSO}_4$ ).

Минеральный состав фосфогипса ГХЗ (%):  $\text{CaSO}_4\cdot2\text{H}_2\text{O}$  (97,0–97,2);  $\text{AlPO}_4$  и  $\text{FePO}_4$  (0,8–1,2);  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  и  $\text{K}_2\text{SiF}_6$  (0,5);  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (0,7–0,85),  $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$  и  $\text{CaF}_2$  (0,7).

По внешнему виду фосфогипс – это полидисперсный материал серо-белого цвета, представленный агрегатами частиц, комками с межагрегатными пустотами. Он содержит примеси неоргани-

ческих и органических соединений – водорастворимых и водонерастворимых, адсорбированных на поверхности кристаллов. По гранулометрическому составу фосфогипс близок к пылеватому песку (содержание частиц крупнее 0,1 мм составляет менее 75%, а частиц менее 10 мкм – около 40–55%). В отвалах он содержит до 40–50% влаги, и в этом случае при механическом воздействии способен разжигаться с выделением свободной воды и уменьшением объема. Его полная влагоемкость (когда все поры заняты водой) составляет 65–70%, максимальная молекулярная влагоемкость (наименьшая влагоемкость в условиях свободного оттока) – 15–16%, что характеризует способность фосфогипса удерживать влагу силами молекулярного скрепления. Пластическими свойствами он не обладает. Его удельная поверхность составляет 3400–4300 см<sup>2</sup>/г. Плотность фосфогипса при естественной влажности изменяется от 1,09 до 1,72 г/см<sup>3</sup>, плотность твердого компонента – от 2,53 до 2,83 г/см<sup>3</sup>. Угол естественного откоса при влажности, равной 44%, составляет 55°.

Фосфогипс отличается достаточно высокими прочностными показателями: угол внутреннего трения равен 30–34°, удельное скрепление – 0,031–0,042 МПа. Он обладает квазитектоническими свойствами, способен разжигаться при вибрации, встряхивании или перемешивании. При его уплотнении происходит уменьшение пористости, отжатие или перемещение в нем воды.

По фильтрационной способности фосфогипс близок к супесчаным грунтам. Его коэффициент фильтрации ( $K_f$ ) зависит от плотности. Свежеотсыпанный фосфогипсовый шлам обладает высокой проницаемостью ( $K_f = 1,0–3,0$  м/сут). По мере увеличения высоты отвалов нижние слои фосфогипса уплотняются (при высоте отвалов 40–60 м величина дополнительного давления на земную поверхность достигает значений 4–6 МПа), что ведет к снижению их проницаемости. Так, с увеличением плотности с 1,25 до 1,4 г/см<sup>3</sup>  $K_f$  уменьшается с 1,04 до 0,8 м/сут, а при плотности 1,5 г/см<sup>3</sup>  $K_f$  достигает 0,47 м/сут. Это предопределяет формирование в техногенных массивах водоносных горизонтов, режим которых в значительной степени будет определять условия устойчивости откосов за счет гидростатических и гидродинамических сил. С увеличением плотности фосфогипса значительно повышаются его прочностные показатели. В рыхлом состоянии он

характеризуется наименьшими значениями удельного скрепления. По результатам штамповых испытаний, модуль деформации фосфогипса в интервале нагрузок 0,05–0,25 МПа составляет 4,0–4,5 МПа [17].

**Лигнин** – продукт отходов целлюлозно-бумажной промышленности и гидролизного производства. В Белоруссии он долгое время образовывался на двух заводах – в Речице и Бобруйске – и накапливался в отвалах. В настоящее время Речицкий гидролизный завод не функционирует, а на Бобруйском заводе биотехнологий производство значительно сократилось. Тем не менее на объектах складирования (в отвалах) накопилось более 3,4 млн т лигнина, хранящегося не один десяток лет.

Внешне лигнин представляет собой опилкоподобную массу темно-коричневого цвета со специфическим запахом и высокой влажностью (55–70%). В его минеральном составе кроме собственно лигнина (48–72%) присутствуют полисахариды (до 12–30%), смолистые вещества (7–19%), зола (до 9%), редуцирующие вещества (до 10%). Из вредных органических соединений в лигнине установлено присутствие (мг/кг): формальдегида (0,33–5,61, в среднем 3,23); фенолов (14–28, в среднем 20,4); фенантрена (0,011–0,099, в среднем 0,042); метанола (19,7–73,2, в среднем 50,24, причем в отвале до глубины 10 м метанол не обнаружен, а в свежем лигнине его концентрация составляет 93 мг/дм<sup>3</sup>). Кроме органических соединений в лигнине присутствуют сульфаты, содержание которых колеблется от 4803 до 12 008 мг/кг и в среднем составляет 7235 мг/кг [26].

По физико-химической природе лигнин – это трехфазная полидисперсная система с размерами частиц от нескольких миллиметров до микронов и меньше. Он не обладает связностью и пластичностью. Его физико-механические свойства в значительной степени зависят от состава и влажности. С увеличением влажности с 50 до 60% статическое напряжение сдвига уменьшается с 0,27·10<sup>-3</sup> до 0,06·10<sup>-3</sup> МПа. С увеличением количества присутствующих в лигнине трудногидролизуемых полисахаридов плотность частиц повышается с 0,21 до 0,31 г/см<sup>3</sup>, а предел прочности при сжатии – с 0,03 до 0,09 МПа. По физико-механическим свойствам лигнин близок к заторфованным грунтам с характерной для них высокой сжимаемостью.

Отметим, что рассмотренные выше массивы техногенных грунтов не только

являются источниками формирования литохимических и гидрогеохимических полиглобальных аномалий, характеризующихся широкими ассоциациями элементов-загрязнителей, но и формируют сложные и динамичные эколого-геологические системы, требующие комплексного подхода к оценке и управлению. Их влияние на окружающую среду далеко выходит за рамки простого загрязнения, затрагивая качество почв, поверхностных и подземных вод, а также здоровье населения, проживающего вблизи территорий их размещения.

### Особенности техногенного фонта

Почвы, находящиеся в сфере влияния предприятий различных отраслей промышленности (машиностроительной, пищевой, нефтеперерабатывающей, химической и в том числе фармацевтической, деревообрабатывающей, легкой, производства резиновых, пластмассовых изделий и строительных материалов и др.), классифицируются как техногенные и представляют собой измененные человеческой деятельностью земельные ресурсы, в некоторой степени сочетающие в себе признаки почв горнодобывающих и селитебных территорий.

В зависимости от характера дневной поверхности, территории предприятий, особенно крупных, подразделяются на два основных типа – открытые (с частичным озеленением) и закрытые (застроенные и заасфальтированные) (см. рис. 2). На открытых территориях выделяют три группы поверхностных почвенно-грунтовых образований – естественно-антропогенные поверхности преобразованные почвы, антропогенные глубоко преобразованные почвы, искусственно созданные почвоподобные (техноземы) и непочвенные (насыпные, намывные и другие техногенные грунты) образования. На заасфальтированных закрытых территориях под асфальтобетоном или другим дорожным покрытием формируется особая группа почв – экраноземы, или запечатанные грунты [27].

**Антропогенные поверхности преобразованные почвы** сочетают в себе горизонт, претерпевший нарушения, изменения или добавления материала на глубину менее 50 см, и ненарушенную срединную и нижнюю части профиля. Эти почвы сохраняют типовое название с добавлением первой части слова «техноген» (технодерново-подзолистые, аллювиальные технодерновые и т.д.).

**Антропогенные глубоко преобразованные почвы** образуют группу,

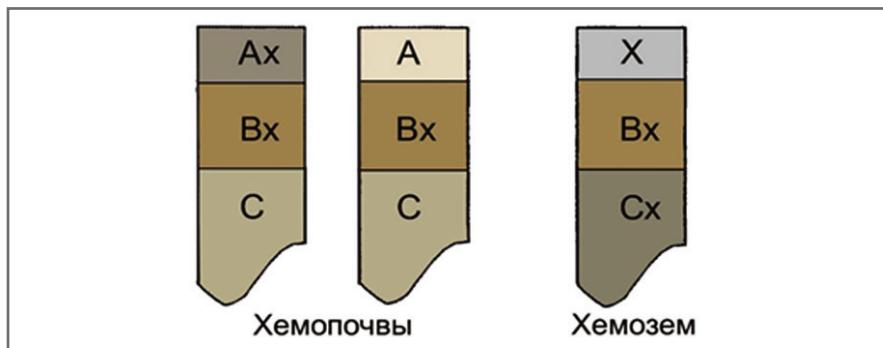


Рис. 6. Схемы строения профилей химически преобразованных почв (нижним индексом «*х*» обозначены горизонты с признаками видимого химического загрязнения) [27]

включающую: механически (физически) преобразованные почвы; химически преобразованные почвы; почвоподобные тела – техноземы.

*Механически (физически) преобразованные почвы* близки к урбаноземам, профиль которых состоит из одного или нескольких подгоризонтов разной мощности и качества, образованных из своеобразного пылевато-гумусного субстрата с примесью строительного мусора. Они формируются на грунтах различного происхождения и на культурном слое. Иногда верхний подгоризонт подстилается непроницаемым материалом (асфальтом, фундаментом, бетонными плитами, коммуникациями). Профили механически преобразованных почв характеризуются отсутствием природных генетических горизонтов до глубины 50 см и более.

*Химически преобразованные почвы* (рис. 6), профиль которых претерпел существенные изменения свойств и строения вследствие интенсивного химического загрязнения (атмосферного и гидрогенного), классифицируются как индустрizемы и интруземы. *Индустрizемы* (это условный термин, иногда их называют также *поллютоземами*) – это почвы промышленно-коммунальных зон, характеризующиеся экстремально высоким техногенным загрязнением тяжелыми металлами и другими токсикантами, приводящим к деградации почвенного поглощающего комплекса, резкому снижению биоразнообразия и в ряде случаев к абиотичности. Они отличаются уплотнением, бесструктурностью, содержанием более чем 20% токсичного непочвенного материала и частично могут соответствовать *хемоземам* – техногенным почвам районов добычи полезных ископаемых. *Интруземы* (это условный термин, их также можно назвать *нефтеземами*, *петролеумными почвами*, *ПАУ-почвами*) – это почвы, формирующиеся в ре-

зультате проникновения в них нефтепродуктов (масла, мазута, бензина) вследствие аварийных ситуаций или бесхозяйственных действий человека на автозаправочных станциях, автостоянках и др. Они характеризуются наличием нефтепродуктов на поверхности или в почвенном профиле. Интруземы являются аналогом почв, образующихся при авариях на нефтепромыслах.

*Техноземы* представляют собой целенаправленно искусственно созданные почвоподобные тела, образующиеся в процессе рекультивации антропогенно трансформированных территорий. Структура их профилей включает один или несколько насыпных слоев, состоящих из природных или техногенных грунтов, общей мощностью более 50 см и поверхностного плодородного слоя. Функционируя как почвы, техноземы, однако, отличаются от них отсутствием генетической взаимосвязи между насыпными слоями и, как следствие, отсутствием системы генетических горизонтов. Несмотря на это, техноземы обладают рядом важных почвенных функций, включая продукционную, сорбционную и водно-миграционную. Как и в профилях природных почв, верхний горизонт техноземов обогащен органическими веществами и представляет собой перегнойный или гумусовый горизонт, полученный из почвы-донора или специально подготовленной плодородной смеси. Техноземы широко распространены в техногенно нарушенных ландшафтах, где реализуются программы биологической рекультивации.

*Техногенные грунты промышленного происхождения, не встречающиеся в природе*, представлены инертными и токсичными отходами различных производств (шлаками, золами, горелой землей, иловыми осадками и т.д.) и твердыми отходами полигонов. По классификации почв России они частично могут со-

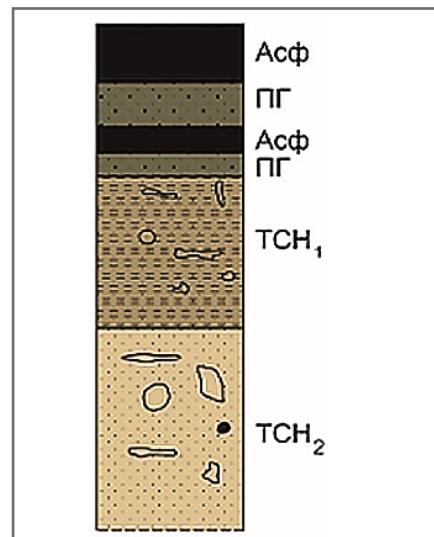


Рис. 7. Морфологическое строение экраноземов, развитых в промышленных зонах (Асф – асфальтобетон, ПГ – песчано-гравийная подушка; ТСН – техногенный перемешанный грунт) [28]

ответствовать ТПО, группам артифабрикатов и токсифабрикатов.

*Экраноземы* (это условный термин, их также называют *экранированными почвами*, *запечатанными почвами* – *sealed soils*) – отдельная группа почв, находящихся под дорожными асфальтобетонными покрытиями (рис. 7). Они существенно уплотнены, в них изменены водный, тепловой и газовый режимы, микробиота функционирует в основном по анаэробному типу, не происходит поступления веществ извне, при укладке покрытия могла быть разрушена верхняя часть профиля. При дорожном строительстве часто производят полное срезание почвенного профиля до нижележащих грунтов и/или последующее наложение на них нового материала и дорожного покрытия. В этом случае выделяется группа *запечатанных грунтов*.

#### Особенности биотических компонентов промышленных ЭГС

#### Особенности техномикробоценоза

В состав техномикробоценозов промышленных эколого-геологических систем, как и других ЭГС, входят различные группы микроорганизмов, включая простейших, низшие водоросли, низшие грибы и бактерии (в том числе актиномицеты). Наибольшая их часть обитает в почве, где они играют важную роль в поддержании экосистемных процессов и биогеохимических циклов. Однако, несмотря на их значимость, на территории Белоруссии практически не исследовано

микробное разнообразие, характерное для анализируемых ЭГС. Это до некоторой степени затрудняет осмысление воздействий антропогенных факторов, связанных с работой предприятий различных отраслей промышленности, на микробное разнообразие и функциональные возможности почвенных экосистем. Вместе с тем исследования, проведенные Ю.М. Бачурой, Г.А. Заварзинным, М.А. Каниськиным, А.Е. Кузнецовым, Т.А. Семеновой, В.А. Тереховой, О.М. Храмченковой и другими [29–31 и др.], дали ценную информацию для характеристики микробных сообществ в контексте функционирования промышленных ЭГС на территории Белоруссии, особенно для массивов техногенных грунтов складских эколого-геологических систем.

Например, Ю.М. Бачурой и О.М. Храмченковой в 2006–2008 годах был изучен видовой и/или родовой состав почвенных водорослей на отвалах фосфогипса ГМЗ [29]. Причем эти авторы проводили исследования на участках отвалов следующих категорий:

I – свежие отвалы (Ф1): с полным отсутствием высших растений;

II – отвалы среднего возраста: без растений (ФПа); с наличием мохового покрова (ФПб); с травянистыми растениями и мхами (ФПв);

III – старые отвалы с травянистыми и древесными растениями (ФIII), а также прилегающие к ним территории вдоль дороги между отвалами фосфогипса (ПФ1) и в лесу напротив свежего отвала фосфогипса (ПФ2) с травянистыми и древесными растениями.

На всех изученных участках были выявлены представители родов *Chlamydomonas* и *Chlorella*. Водоросли родов *Phormidium*, *Leptolyngbya*, *Chlorococcum*, *Scotiellopsis* и *Pseudococcotula* встречались практически повсюду. Однако представители родов *Phormidium* и *Leptolyngbya* не были зафиксированы на свежих и средневозрастных отвалах фосфогипса, а роды *Chlorococcum* и *Scotiellopsis* отсутствовали на средневозрастных отвалах (без растений и со мхами). Как было установлено ранее [32], эти водоросли отличаются широким диапазоном распространения и благодаря ряду своих морфологических и физиологических особенностей способны существовать в крайне неблагоприятных условиях.

Для развития диатомовых водорослей (*Bacillariophyta*) экологические условия отвалов фосфогипса оказались непригодными.

Распространение других родов водорослей было тесно связано с возрастом

отвала и, вероятно, с химическим составом субстрата. Представители рода *Merismopedia* предпочитала средневозрастные отвалы, а *Synechocystis salina* – более зрелые отвалы и прилегающие территории, где вымывание анионов из почв создавало более благоприятные условия. Зеленые водоросли (*Chlorophyta*) оказались наиболее устойчивыми и доминировали на всех участках, в то время как желто-зеленые водоросли (*Xanthophycaceae*) были представлены слабо.

Наибольшее разнообразие водорослей наблюдалось в зоне вдоль дороги между отвалами, что может быть связано с промежуточными условиями.

А наиболее экстремальные условия на свежих и средневозрастных отвалах ограничивали развитие альгогруппировок [29].

Определенные закономерности в особенностях обитания микроорганизмов на отвалах фосфогипса можно также наблюдать и по отношению к другим видам микробных сообществ. М.А. Каниськин и его коллеги [31] выявили изменения в сообществах микроскопических грибов (микромицетов) на участках, расположенных на разных расстояниях от отвалов фосфогипса. Эти авторы показали, что биогенные элементы, несмотря на их большое количество в фосфогипсе, не способствуютнейтрализации его токсических свойств. Влияние фосфогипса на общее количество и структуру микромицетных сообществ, представленных главным образом пенициллами, проявляется нечетко и может выражаться в стимуляции роста одних видов рода *Penicillium*, подавлении других и практически отсутствии влияния на третьи. В то же время различия в морфобиологической структуре микробиоты на разных расстояниях от отвалов фосфогипса проявляются достаточно четко. Ближе к отвалам наблюдается значительное увеличение доли споровой биомассы из-за воздействия фосфогипса [31].

Микроорганизмы играют важную роль в переработке лигниновых отвалов, которые образуются как побочный продукт на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности и на гидролизных заводах. На этих отвалах формируются сложные экосистемы, в которых микроорганизмы берут на себя роль ключевых переработчиков органических соединений. Исследования [30] показывают, что ведущую роль в разложении лигнина играют аэробные базидиомицеты. Биодеградация лигнина – это окислительный процесс, осуществляемый в первую очередь грибами – возбудителями белой гнили (например, базидиомицетами вида *Phanerochaete chrysosporium*). Они разрушают лигнин с образованием почти белой легкометаболизируемой массы, состоящей из целлюлозы и гемицеллюлозы. Большинство представителей этой группы грибов являются сапротрофными, но некоторые (например, *Armillaria mellea*) известны как фитопатогенные. Частично разлагают лигнин актиномицеты рода *Streptomyces*, бактерии родов *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Nocardia*, *Pseudomonas*. Процесс разложения происходит при участии таких ферментов, как пероксидазы, лигниназы, которые катализируют восстановление пероксида водорода с образованием в качестве промежуточных продуктов высокореакционноспособных кислородных радикалов.

Ключевую роль играют микроорганизмы и в очистке почв и других грунтов, загрязненных нефтью и нефтепродуктами (НП). В условиях, когда обычная почвенная жизнь подавлена, именно микроорганизмы становятся основными агентами разложения этих загрязнителей. Разложение углеводородов в почве происходит благодаря углеводородокисляющим микроорганизмам. Они способны использовать углеводороды в качестве источника энергии и строительного материала, окисляя их до углекислого газа и воды либо преобразуя их с образованием соединений, доступных для других микроорганизмов. Установлено, что разложение нефти и НП в почве осуществляется местными (аборигенными) углеводородокисляющими микроорганизмами, имеющими широкое распространение практически во всех природных зонах [33]. Эффективное разложение сложной смеси нефтепродуктов требует участия целого сообщества микроорганизмов.

Углеводородокисляющие микроорганизмы обладают необходимыми ферментами (оксигеназами), способностью поглощать гидрофобные вещества и выделять биоэмальгаторы. Характерной особенностью этих микроорганизмов является наличие углеводородных включений в их цитоплазме.

В процессе окисления нефтяных углеводородов участвуют различные группы микроорганизмов, включая: бактерии (22 рода); мицелиальные (плесневые) грибы (24 рода); такие одноклеточные грибы, как дрожжи (19 родов); зеленые микроводоросли (например, *Chlamydomonas*, *Chlorella*); жгутиковых простейших (например, *Euglena*).



**Рис. 8.** Сорно-рудеральная растительность на отвалах лигнина на полигоне «Деражня» Речицкого гидролизного завода (фото А.Н. Галкина)

Некоторые виды бактерий, такие как *Bacillus cereus*, *Staphylococcus xylosus* и *Pseudomonas aeruginosa*, производят биоэмульгаторы, которые облегчают окисление нефти и НП. Коринеформные бактерии, содержащие ненасыщенные миколовые кислоты, способны усваивать углеводороды даже при низких температурах [34].

В деградации нефти также участвуют грибы родов *Aspergillus*, *Aureobasidium*, *Beauveria*, *Absidia*, *Mortierella*, *Mucor*, *Penicillium*, *Candida*, *Dabayomyces*, *Leucosporidium*, *Lodderomyces*, *Metschnikowia*, *Pichia*, *Rhodosporidium*, *Rhodotorula*, *Saccharomyces*, *Schwanniomyces*, *Selenotila*, *Sporidiobolus*, *Sporobolomyces*, *Torulopsis*, *Trichosporon* [35].

Рассматривая техномикробоценоз производственной эколого-геологической системы, который, как и у большинства техногенных ЭГС, представлен простейшими, низшими водорослями, низшими грибами и бактериями (в том числе актиномицетами), следует отметить, что в условиях функционирования данной экосистемы может создаваться благоприятная среда для развития патогенных микроорганизмов (бактерий и грибов), которые быстро адаптируются к особым почвенным условиям (со слабощелочной средой, наличием технологических загрязнителей, повышенной температурой и т.д.), и вытесняют собственную микрофлору почвы.

Кроме того, производственные процессы часто приводят к увеличению концентрации тяжелых металлов в почве, что, в свою очередь, изменяет состав микробного сообщества. Например, длительное поступление в почву свинца и меди вызывает значительные изменения в группах и видах микроорганизмов. В таких условиях начинают

доминировать те микроорганизмы, которые обладают способностью противостоять токсичному воздействию тяжелых металлов. Это связано с их умением преобразовывать тяжелые металлы в менее опасные формы или использовать их в своих метаболических процессах. Гены, отвечающие за устойчивость к токсичным металлам, локализуются в плазмидной ДНК бактерий и могут передаваться между близкородственными их видами, что способствует распространению устойчивости в микробных популяциях [36].

Таким образом, техномикробоценоз производственной ЭГС – это сложный и динамичный комплекс, в котором антропогенное воздействие становится мощным фактором эволюции микробных организмов. Адаптация к экстремальным условиям, вызванным техногенным загрязнением, приводит к формированию уникальных микробных сообществ, обладающих специфическими свойствами.

#### Особенности техноФитоценоза

Фитоценозы промышленных территорий в большинстве своем являются довольно специфическими и часто деградированными растительными сообществами. Они формируются под влиянием целого комплекса негативных факторов, связанных с производственной деятельностью человека. В таких фитоценозах можно встретить:

1) обедненный видовой состав (многие виды растений просто не выдерживают загрязнения почвы и воздуха, поэтому остаются только самые устойчивые и неприхотливые);

2) преобладание сорных растений (на промышленных территориях часто доминируют сорняки, которые быстро

размножаются и хорошо приспособлены к неблагоприятным условиям);

3) измененную структуру сообщества (нарушается естественное соотношение между разными видами растений, что приводит к упрощению экосистемы);

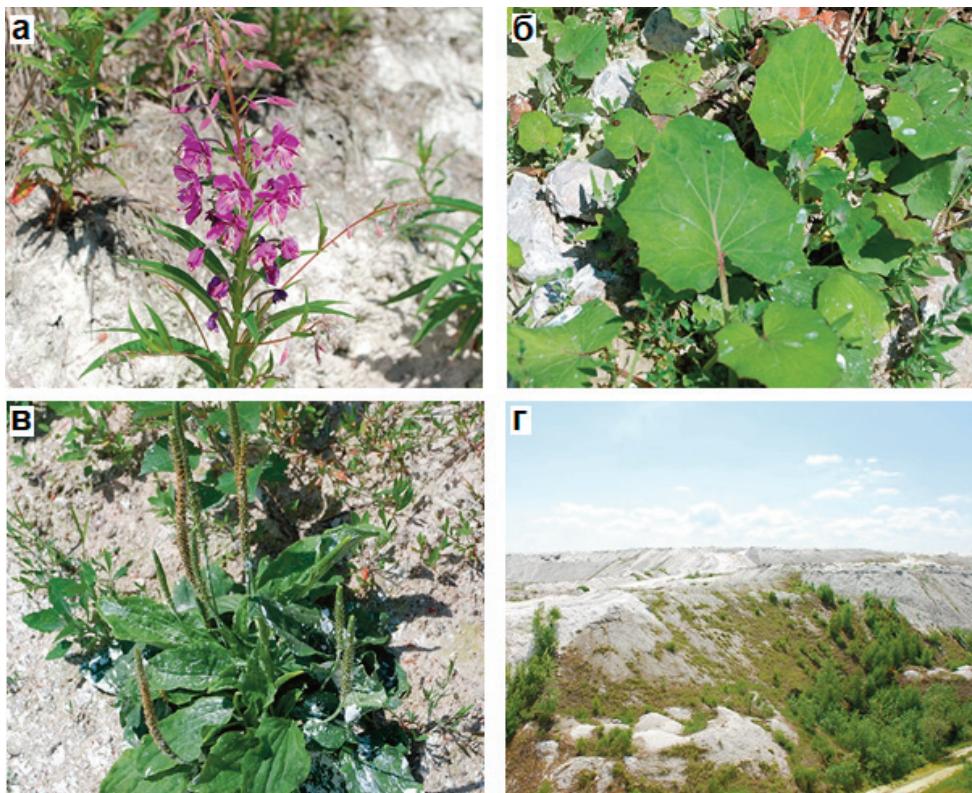
4) замедленный рост и развитие (растения на загрязненных территориях часто отстают в росте и развитии, имеют меньшую биомассу и сниженную репродуктивную способность);

5) накопление токсичных веществ (растения могут накапливать в своих тканях тяжелые металлы и другие загрязнители, что делает их опасными для животных и человека).

Тем не менее следует отметить, что фитоценозы на промышленно освоенных территориях не всегда характеризуются сильной деградацией. В ряде случаев благодаря рекультивационным работам и созданию благоприятных условий существует возможность восстановить растительность и сформировать более устойчивые и разнообразные растительные сообщества.

Помимо сказанного следует подчеркнуть, что состояние и характеристики фитоценозов промышленных территорий сильно варьируют в зависимости от типа производства, возраста предприятия, применяемых технологий и, конечно, от проводимых мероприятий по охране окружающей среды. Например, фитоценозы вокруг металлургического комбината и вокруг нефтехимического завода будут существенно отличаться друг от друга.

Важным фактором является и возраст предприятия. На территориях давно заброшенных промышленных объектов может происходить постепенное самовосстановление растительного по-



**Рис. 9.** Травянистые растения на отвалах фосфогипса и характер образования растительного покрова на них: а – иван-чай (*Chamerion angustifolium*); б – мать-и-мачеха (*Tussilag farfara*); в – подорожник большой (*Plantago major*); г – обрастание травянистыми и древесно-кустарниковыми растениями нижних и средних участков вогнутой поверхности склона отвала [37]

крова. Этот процесс, однако, часто идет очень медленно и может осложняться высокой степенью загрязнения почвы и отсутствием в ней необходимых питательных веществ. В таких случаях даже устойчивые виды растений могут испытывать серьезный стресс, что проявляется в изменениях их морфологических и физиологических характеристик.

С другой стороны, на современных предприятиях, где применяются более экологичные технологии и регулярно проводятся мероприятия по очистке территорий, фитоценозы могут быть более разнообразными и устойчивыми. Там можно встретить не только сорные растения, но и некоторые виды луговых трав и даже кустарников. Однако даже в таких случаях видовой состав растений остается обедненным по сравнению с естественными экосистемами.

Особое внимание следует уделять тому, как растения адаптируются к условиям загрязнения. Некоторые из них способны накапливать тяжелые металлы, не испытывая на себе негативных последствий, в то время как другие вырабатывают защитные механизмы против токсичных веществ. Например, на отвалах лигнина на полигоне «Деражня» Речицкого гидролизного завода, образовавшихся в 1971–

2000 годах на площади 13 га и имеющих общую массу около 1 млн т, можно встретить такие сорные виды, как лебеда обыкновенная (*Chenopodium album*), полынь обыкновенная (*Artemisia vulgaris*), пастушья сумка обыкновенная (*Capsella bursa pastoris*), одуванчик обыкновенный (*Taraxacum officinale*), лопух большой (*Arctium lappa*), пырей ползучий (*Elytrigia repens*) и др. (рис. 8).

Важным аспектом, который следует учитывать при анализе фитоценозов на промышленных территориях, особенно на полигонах складирования ТПО, является влияние окружающей среды на биологическое разнообразие. В условиях загрязнения, вызванного наличием в отходах вредных веществ, многие виды растений могут не только исчезать, но и трансформироваться, адаптируясь к новым условиям с образованием специфических сообществ.

Кроме того, стоит отметить, что на восстановление растительности на площадках складирования промышленных отходов могут оказывать влияние не только химические, но и физические факторы. Например, не только уровень кислотности, но и структура почвенно-го субстрата, его плотность и другие показатели могут существенно влиять на

прорастание семян и развитие корневых систем растений.

Показательным примером в этом отношении являются отвалы фосфогипса Гомельского химзавода. Здесь растения заселяют поверхность фосфогипса повсеместно. Происходит самозаражение преимущественно травянистыми видами. Общее проектное покрытие в местах образования растительного покрова составляет от 6 до 60% (рис. 9). Интенсивнее обрастают нижние и средние части склонов и их подножия, менее подверженные внешним воздействиям (проходам техники, подсыпке и уплотнению фосфогипса, ветру). Активно заселяются вогнутые участки поверхности и трещины, защищенные от ветра (см. рис. 9, г), удобные для закрепления семян и проростков.

Согласно исследованиям А.П. Гусева [38], восстановление экосистем на территории ГХЗ происходит поэтапно – за три последовательные стадии сукцессии.

На первой стадии в наиболее увлажненных местах, обогащенных мелкоземом и изначально лишенных растительности, поселяются виды растений, семена которых привносятся в отвальный комплекс из смежных экосистем. Для этой стадии характерны слаборазвитый растительный покров, отсутствие под-

стилочного горизонта, низкое видовое разнообразие, слабое естественное возобновление древесно-кустарниковых видов. На приотвальных участках в растительном сообществе доминируют два вида – вейник наземный (*Calamagrostis epigeios*, доля в покрытии 44,4%, встречаляемость 85%) и иван-чай (*Chamerion angustifolium*, 50 и 90% соответственно) (см. рис. 9, а). Естественно возобновляющиеся древесные породы представлены березой повислой (*Betula pendula*), сосновой обыкновенной (*Pinus sylvestris*), тополем дрожащим, или осиной (*Populus tremula*), ивами (видами рода *Salix*). Плотность их произрастания составляет от 200 до 3500 экз./га, из которых более 90% имеют высоту ниже 1 м. На склонах отвалов растительность отмечается только в самой нижней части (1/10) и характеризуется весьма низкой численностью естественного возобновления и слабым развитием травяного покрова, который формируется вейником наземным и иван-чаем.

На второй стадии наблюдается двукратное увеличение проективного покрытия травяного яруса и 2,7-кратный рост численности естественного возобновления. В отдельных местах образуется маломощная подстилка. В сообществах приотвальных участков все еще преобладают иван-чай (доля в покрытии 34,0%, встречаляемость 95%) и вейник наземный (45,4 и 50% соответственно), однако начинают появляться костёр кровельный (*Bromus tectorum*), скерда кровельная (*Cerepis tectorum*) и ряд других видов. Увеличивается видовое разнообразие древесной и кустарниковой растительности (см. рис. 9, г.). На склонах отвалов естественно возобновившаяся численность колеблется от 100 до 5000 экз./га (91,5% – ниже 1 м). По сравнению с первой стадией, видовое разнообразие растений возрастает в 2,9 раза. Травяной ярус имеет покрытие от 5 до 50% и складывается из тех же видов – вейника наземного, иван-чая и костра кровельного.

На третьей стадии развития растительности появляется прерывистый древесно-кустарниковый ярус. Молодые деревья и кустарники высотой от 1 до 2 м составляют 26% от общего числа, а более высокие (выше 2 м) – 8,8%. На участках, прилегающих к отвалам, в травяном покрове доминируют вейник наземный (встречаемость 23,2%, покрытие 70%), иван-чай (12,7 и 85% соответственно), скерда кровельная (5,4 и 25% соответственно), пижма обыкновенная (*Tanacetum vulgare*), костёр кро-

вельный. Также встречаются горошек мышиный (*Vicia crassa*), полынь обыкновенная (*Artemisia vulgaris*), подорожник (*Plantago*), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium*), мать-и-мачеха (*Tussilago farfara*) (см. рис. 9, а-в). На склонах отвалов плотность подроста варьирует от 100 до 5400 экз./га (28,9% – выше 1 м). По сравнению со второй стадией разнообразие древесно-кустарниковых видов увеличивается в 1,3 раза. Травяной покров практически полностью предотвращает водную эрозию [38].

А.П. Гусевым [38] также было установлено, что скорость и характер сукцессионных процессов на разных участках отвалов фосфогипса варьируют в зависимости от их расположения. Наиболее интенсивное заселение растениями наблюдается у подножий склонов, что обусловлено оптимальными гидрологическими условиями и небольшой мощностью фосфогипса (5–50 см) над погребенными почвами. Такие участки характеризуются более ранним появлением на них растительности, а также более высокими показателями численности естественного возобновления (в 5,2; 2,5 и 2,0 раза на первой, второй и третьей стадиях соответственно), проективного покрытия травяного яруса (в 2,5; 1,2 и 1,1 раза соответственно) и видового разнообразия по сравнению со склоновыми участками. На вершинах же отвалов сукцессия протекает наиболее медленно, а растительный покров, формирующийся там лишь на третьей стадии, характеризуется минимальными значениями численности подроста, проективного покрытия травяного яруса, видового разнообразия и мощности подстилочного горизонта. По мере развития сукцессионных процессов различия в скорости сукцессии между подножием и склонами уменьшаются.

#### **Особенности технозооценоза**

Состав технозооценозов изучаемых ЭГС представлен как беспозвоночными, так и позвоночными животными и во многом обусловлен особенностями производственных процессов, а также характеристиками соответствующих личинок, эдафотопов и фитоценозов.

Несмотря на то что беспозвоночные животные составляют наиболее многочисленные и разнообразные группы фауны в этих ЭГС, их изучение пока не получило должного внимания. Информация о воздействии промышленных объектов на почвенных беспозвоночных носит в основном фрагментарный ха-

тер, за исключением работ Э.И. Хотко [39, 40], в которых подробно проанализировано влияние выбросов предприятий нефтеперерабатывающей промышленности и заводов минеральных удобрений на почвенных беспозвоночных хвойных и лиственных лесов.

Например, этот автор [39, 40], исследуя дубовые леса в окрестностях Мозырского нефтеперерабатывающего завода, обнаружил в дубравах, подвергшихся влиянию промышленных выбросов, 70 видов беспозвоночных, из них: 27 видов жужелиц; 15 – стафилинид; 8 – пластинчатоусых; 8 – щелкунов; 5 – долгоносиков; 4 – дождевых червей; 2 – дипlopод; 1 – мягкотелок. Количество разнообразие беспозвоночных в контрольных (не подвергавшихся загрязнению) и в загрязненных дубравах существенно не различалось (в контрольных – 51 вид, в загрязненных – 54 вида). Причем 50% видов присутствовали в обоих этих типах дубрав, то есть общими оказались 35 видов, из которых наибольшее соответствие было зафиксировано для дождевых червей, долгоносиков и щелкунов (100 и 66,7% соответственно).

Наблюдались различия в численности отдельных видов. В загрязненных дубравах было зарегистрировано 19 новых видов (27,1% от общего числа), которые не были встречены на контрольных участках. Большинство из этих видов (63,2%) являются типичными обитателями лесов (41,7% из них характерны для дубрав с кисличником). Меньшая часть (21,1%) относится к полевым обитателям и очень небольшая часть (по 5,3%) – к видам, распространенным на лугах и болотах. Вместе с тем 16 видов были обнаружены исключительно в контрольных дубравах с кисличником: 8 видов жужелиц; 6 – стафилинидов; 1 – мягкотелок; 1 – щелкунов. Основная часть из них (81,2%) относилась к лесным видам, 30,8% из которых были типичны для дубрав с кисличником, а полевых и лугово-лесных видов среди них было немного (12,5 и 6,3% соответственно).

В контрольных и загрязненных дубравах наблюдалась примерно одинаковая численность для 15 видов (21,4%). В то же время для 13 видов (18,6%) было обнаружено незначительное снижение численности в загрязненных зонах, в том числе для жужелиц (4 видов), стафилинидов (3), щелкунов (2), долгоносиков (2), дождевых червей (1) и пластинчатоусых (1). Из этих видов 69,2% являются представителями лесной фауны, 15,4% – полевой, 7,7% – лугово-

лесной, 7,7% – лугово-половой. Четыре обнаруженных вида (*Carabus glabratus*, *Geostiba circellaris*, *Ectinus aterrimus*, *Curculio glandium*) типичны для дубрав с кисличником и составляют 44,4% от общего количества беспозвоночных, обитающих в лесах.

Было выявлено, что за счет загрязнения на 7–10% увеличилась численность некоторых видов (*Aporrectodea rosea*, *Geotrupes stercorarius*, *Melolontha melolontha*, *Agrypnus murinus*), которые преимущественно характерны для данного типа дубрав, в то время как другие виды встречаются в различных лесных экосистемах.

Общее количество почвенных беспозвоночных из-за загрязнения снизилось на 32,1% из-за уменьшения численности ктырей, дождевых червей и стафилинидов. В то же время число пластинчатоусых и бекасниц выросло на 67 и 53,1% соответственно. Под воздействием промышленных выбросов изменились 55,6% групп всех беспозвоночных. При этом общая зоомасса беспозвоночных как в контрольных, так и в загрязненных дубравах кисличных оказалась на одинаковом уровне, хотя внутри отдельных групп наблюдались значительные колебания, особенно для ктырей (зоомасса которых при загрязнении снизилась на 73,3%) и двупарногих многоножек (зоомасса которых уменьшилась на 90,2%). Для других групп беспозвоночных изменения в зоомассе были менее заметными.

В загрязненных дубравах наблюдалось небольшое увеличение числа космополитных, голарктических и европейских видов и незначительное снижение количества транспалеарктических и европейско-сибирских видов. Индексы видового разнообразия в загрязненных дубравах кисличных остались прежними, однако уровень выравненности немного упал. Разнообразие экологических групп там вырос с 4 до 6, появились эврибионтная и болотная группы. Изменения коснулись видов двух экологических групп: у полевой группы численность увеличилась, у лесной – уменьшилась. Число видов, специфичных для таких дубрав, было сравнительно небольшим: в контрольных дубравах было встречено 3 вида (пластинчатоусых), в загрязненных – 4 (2 вида жужелиц, 1 вид стафилинидов, 1 вид мягкотелок).

Плотность функциональных групп в дубравах кисличных под воздействием выбросов нефтеперерабатывающей промышленности, как правило, снижалась, особенно для фитофагов и сапрофагов.

Обилие зоофагов составило 59,6% от контрольного уровня, в то время как численность миксофитофагов увеличилась в 2 раза. Отношение численности зоофагов к численности других функциональных групп в загрязненных дубравах снизилось с 0,5 до 0,4. Отношение их зоомассы к зоомассе других функциональных групп также уменьшилось (с 0,2 до 0,1). Изменения зоомассы функциональных групп под влиянием промышленных выбросов были аналогичны изменениям их численности, за исключением зоомассы сапрофагов, которая увеличилась в 1,9 раза.

Не меньший интерес представляют результаты исследований Э.И. Хотько [39, 40] в отношении березовых лесов, расположенных в зоне действия выбросов ОАО «Азот», комбината стройматериалов, ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 города Гродно. Основными загрязнителями там являются (в порядке убывания токсичности): сернистый ангидрид, неорганическая пыль, аммиак, окись углерода, серная кислота. Свой вклад в загрязнение окружающей среды вносит также производство капролактама с выбрасыванием циклогексана, циклогексанола, циклогексанона и паров капролактама.

Вблизи источников загрязнений в березняках, особенно в черничных и мицистых, наблюдалось увеличение кислотности всех слоев почвы [39, 40]. Выросло содержание подвижной формы фосфора и нитратного азота, на глубине 5–10 и 10–30 см повысилось содержание общего и аммиачного азота, катионов магния и кальция. В березняках рядом с источниками загрязнений активно разрослись азотолюбивые растения, особенно сорняки, что способствовало увеличению разнообразия почвенной фауны.

Среди беспозвоночных в березняках разных типов преобладали дождевые черви, долгоносики, щелкунчики, стафилиниды и жужелицы. Дождевые черви были в основном представлены видом *Dendrobaena octaedra*. Их численность в загрязненных березняках иногда достигала 46% от общего числа беспозвоночных, что было значительно выше, чем в контрольных березняках.

В почвах березняков было обнаружено 9 видов долгоносиков. Их численность в загрязненных березняках превышала контрольные значения в 1,8 раза. Сходство видов долгоносиков в этих двух средах составило 55,6%, общими оказались 5 видов. Число видов долгоносиков под воздействием загрязнения увеличилось. При этом выросло количе-

ство европейско-сибирских и транспалеарктических видов, в то время как число голарктических видов осталось тем же.

Количество экологических группировок в загрязненных березняках также не изменилось. Число видов лесной экологической группы увеличилось в 2 раза. Выросли индексы видового разнообразия долгоносиков. Увеличились и показатели выравненности, то есть количественно виды стали более равномерно распределенными. При этом сформировались более крупные их агрегации, которые были распределены случайно или регулярно.

Видовой состав щелкунов в почвах как контрольных, так и загрязненных березняков был представлен 9 видами. Общими оказались 6 видов (совпадение составило 66,7%). Однако доминирующие виды были разными. В загрязненных березняках: увеличилось количество видов щелкунов, в том числе появились новые виды (*Melanotus erythropus*, *Athous haemorrhoidalis* и *Selatosomus latus*); выросло число видов, приуроченных именно к этим березнякам; незначительно увеличилось количество европейско-азиатских и голарктических видов, а также видов лесной экологической группы; количество редких видов снизилось; индексы видового разнообразия увеличились; количественное распределение видов было довольно равномерным; мелкие агрегации щелкунов исчезли и их особи были распределены случайно. Кривая доминантной структуры щелкунов для загрязненных березняков прошла значительно выше контрольной кривой. Это свидетельствовало о том, что численность доминантных видов щелкунов в загрязненных березняках была значительно выше, чем в ненарушенных.

Общее количество видов стафилинидов под влиянием промышленных выбросов увеличилось в 1,6 раза. Число их видов, приуроченных только к загрязненным березнякам выросло в 7 раз, количество редких видов – в 1,4 раза. Сходство видового состава в контрольных и загрязненных березняках не превышало 37,9% (общими оказались 25 видов из 66).

Под влиянием загрязнения увеличилось количество видов всех зоogeографических элементов, присутствовавших в контрольных биогеоценозах, появились широко распространенные космополитные виды, значительно выросли доли видов лесной и полевой экологических групп (в 1,6 и 2,7 раза соответственно), исчезли виды болотной группировки, численность видов эври-

бионтной, лугово-лесной и лугово-болотной групп не изменилась.

Индексы видового разнообразия стафилинидов при загрязнении увеличился в черничных и мицистых березняках, что было обусловлено возрастанием количества их видов и уменьшением численности доминантных видов. Вырос и показатель выравненности, то есть количественное распределение видов стало более равномерным. Расположение кривой доминантной структуры стафилинидов в загрязненных березняках указало на ее более высокую информативность по сравнению с кривой для этой группы насекомых в контрольных березняках. Структура стафилинидов в березняках при загрязнении улучшилась: сократилось количество «геометрических» классов (произошло выравнивание линии, отображавшей кумулятивный процент обилия стафилинидов). Особи стафилинидов в основном распределялись случайно. Только в отдельных загрязненных березняках мицистых могли образовываться их мелкие скопления (на участках площадью примерно 4 м<sup>2</sup>)

В почвах березняков было выявлено 54 вида жужелиц. Количество видов при загрязнении осталось примерно таким же, но их состав и численные соотношения изменились. Видовой состав совпадал с контрольным менее чем на 50% (общими оказались 25 видов). Комплекс доминирующих видов в контрольных березняках включал *Pterostichus melanarius*, *Carabus hortensis*, *Pt. niger*, *Pt. oblongopunctatus*, *C. arvensis*, в загрязненных – *Pt. melanarius*, *Calathus micropterus*, *Oxypselaphus obscurus*, *Pt. niger*, *Pt. oblongopunctatus*. Количество видов, приуроченных только к этим биогеоценозам, при загрязнении уменьшилось в 2 раза. Незначительно снизилось количество европейских и транспалеарктических видов, увеличилось число европейско-сибирских, голарктических, европейско-арктических и европейско-средиземноморских видов. Количество экологических группировок уменьшилось с 8 до 6. Лугово-болотные и болотные группы исчезли. Количество видов в лесной, лугово-полевой и полевой экологических группах несколько выросло, в лугово-лесной и луговой – незначительно снизилось, в эврибионтной – осталось прежним.

При загрязнении почв березняков достоверно снизились индексы видового разнообразия жужелиц и значения выравненности; появились виды с очень высокой численностью, однако количество их стало меньше, то есть доминантная структура для жужелиц в конт-

рольных березняках была более информативной. Линия, характеризующая структуру сообществ жужелиц, при загрязнении стала ломаной, то есть выросло количество «геометрических» классов. Размещение особей жужелиц по площади носило случайный характер, но на небольших площадях они образовывали агрегации [39, 40].

Особый интерес представляют результаты фаунистических исследований А.П. Гусева [38], который проанализировал сукцессионные процессы в отвалах фосфогипса ГХЗ. В частности, изучение населения беспозвоночных в подстильном горизонте показало следующее. В ходе сукцессии наблюдалось появление и постепенное увеличение численности и биомассы этих животных. Уже на второй стадии в подстилке появились паукообразные, муравьи, низшие бескрылые, жуки. Биомасса мезофауны колебалась в пределах 0–180 мг/м<sup>2</sup> (в среднем составляя 85,6 мг/м<sup>2</sup>); численность – в пределах 0–88 экз./м<sup>2</sup> (в среднем составляя 34,0 экз./м<sup>2</sup>). Основная часть биомассы складывалась из муравьев (50,5%), личинок насекомых (35,1%) и паукообразных (8,4%). В экологической структуре преобладали хищники (59,0% биомассы) и сапрофаги (35,0%).

На третьей стадии, по сравнению со второй, общая численность беспозвоночных выросла в 2,6 раза, число видов – в 2,5 раза. Биомасса колебалась в пределах 104–332 мг/м<sup>2</sup>, в среднем составляя 272,0 мг/м<sup>2</sup> (биомасса личинок насекомых была равна 49,5%; муравьев – 25,9%; жуков – 5,3%). В экологической структуре доминирование перешло к группе сапрофагов, которые стали составлять 55,0% биомассы.

Все учтенные представители беспозвоночных обитали в подстильном горизонте, а в слое фосфогипса (на глубине обследования 5 см) они отсутствовали даже на третьей стадии. Это указывает на то, что процесс почвообразования находился только на начальном этапе и фиксировался только по специфической коре выветривания, сформировавшейся на фосфогипсовом субстрате. Слой сильновыетрелого фосфогипса на третьей стадии имел мощность около 1 см, а мощность слоя фосфогипса, подверженного изменениям (которые диагностировались по изменениям его окраски и другим визуальным признакам), составляла в местах наличия растительности 5–10 см [38].

Среди позвоночных животных, экологически связанных с промышленными ЭГС на территории Белоруссии, выде-

ляют многих представителей их основных групп. Здесь обитают рептилии, птицы и млекопитающие. Например, из рептилий здесь можно встретить прыткую ящерицу (*Lacerta agilis*). А среди птиц особенно часто встречаются воробышкообразные (*Passeriformes*), врановые (*Corvidae*) и чайковые (*Laridae*). Разнообразие птиц, впрочем, не ограничивается этими группами. В зависимости от типа промышленного объекта и окружающего ландшафта, там можно встретить и хищных птиц, таких как пустельга или канюк, использующих для обзора и гнездования в том числе высокие здания и сооружения. Водоемы, образовавшиеся в результате промышленной деятельности человека, привлекают водоплавающих птиц, например крякв и лысух.

Что касается млекопитающих, то в промышленных зонах страны можно встретить как мелких грызунов, таких как полевки и мыши, так и более крупных животных. Заброшенные здания и склады становятся убежищами для летучих мышей. К жизни на окраинах промышленных территорий приспособились зайцы и лисы. Вблизи лесных массивов можно встретить даже косулю или лося, случайно зашедших на территорию промышленного объекта.

Важно отметить, что присутствие этих животных в составе промышленных ЭГС не всегда является признаком благополучия. Часто это бывает вынужденная адаптация животных к неблагоприятным условиям при нарушении естественных экосистем.

## ВЫВОДЫ ►

1. Все компоненты промышленных ЭГС – как abiотические, так и биотические – характеризуются своими комплексами специфических характеристик, обусловленных влиянием промышленной деятельности человека. Это необходимо учитывать при их систематике, описании и при анализе экологических функций литосферы.

2. Показано, что промышленные ЭГС составляют весьма значительную долю среди прочих техногенных ЭГС Белоруссии. Поэтому именно к их анализу и изучению должно быть приковано внимание исследователей в области экологической геологии и геоэкологии.

3. Выявленные закономерности и особенности промышленных ЭГС Белоруссии необходимо учитывать при инженерно-экологических исследованиях и изысканиях. Их можно рассматривать как общие для аналогичных ЭГС и за пределами Республики, в том числе в России. ■



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ►

1. Трофимов В.Т. Эколо-геологическая система, ее типы и положение в структуре экосистемы // Вестник Моск. ун-та. Серия 4. Геология. 2009. № 2. С. 48–52.
2. Галкин А.Н., Королев В.А. Классификация эколо-геологических систем Беларуси на основе учета особенностей литотопов и инженерно-хозяйственных объектов // Літасфера. 2023. № 1 (58). С. 98–109.
3. Королёв В.А., Галкин А.Н. К разработке систематики эколо-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. Королёв В.А., Галкин А.Н. Особенности лесохозяйственных эколо-геологических систем Белоруссии // ГеоИнфо. 2024. Т. 6. № 12. С. 6–19. DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-12-6-19.
5. Королёв В.А., Галкин А.Н. Особенности природных эколо-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.
6. Королёв В.А., Галкин А.Н. Особенности сельскохозяйственных эколо-геологических систем Белоруссии // Вестник МГТУ. 2025. Т. 28. № 1. С. 49–61.
7. Королёв В.А., Галкин А.Н. Особенности эколо-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.
8. Королёв В.А., Галкин А.Н. Особенности эколо-геологических систем массивов торфяных грунтов Белоруссии // Инженерная геология. 2024. Т. 19. № 1. С. 20–40. DOI: <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2024-19-1-24-44>.
9. Королёв В.А., Галкин А.Н. Природные эколо-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>.
10. Валяльщиков А.А., Ильяш В.В., Косинова И.И., Силкин К.Ю., Стародубцев В.С. Курс лекций для подготовки к государственному экзамену по экологической геологии. Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2016. 140 с.
11. Галкин А.Н., Королёв В.А. Особенности функционирования литотехнических систем территории Белоруссии // Инженерная геология. 2014. № 4. С. 28–44.
12. ОАО «Белорусский металлургический завод» // FullTeam.by [веб-сайт]. Дата последнего обращения: 07.04.2025. URL: <https://eae.by/projects/shinoprovod/oao-belorusskiy-metallurgicheskiy-zavod-/>.
13. Прогноз состояния природной среды Беларуси на период до 2035 года / под общ. ред. В.С. Хомича. Минск : Беларуская навука, 2022. 331 с.
14. Прогноз изменения окружающей среды Беларуси на 2010–2020 гг. / под ред. В.Ф. Логинова. Минск: Минсктипроект, 2004. 180 с.
15. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений, 2010 / под общ. ред. С.И. Кузьмина, В.В. Савченко. Минск: РУП «Бел НИЦ «Экология», 2011. 308 с.
16. Национальный доклад о состоянии окружающей среды Республики Беларусь за 2019–2022 годы. Минск, 2023. 172 с.
17. Галкин А.Н., Акулевич А.Ф., Павловский А.И., Галезник О.И. Техногенные грунты. Минск: Вышэйшая школа, 2020. 192 с.
18. Дворцы, природа и много древностей. Что посмотреть на Гомельщине в Беларуси? // Planetabelarus.by [веб-сайт]. Дата последнего обращения: 07.04.2025. URL: [https://dzen.ru/planetabelarus\\_by](https://dzen.ru/planetabelarus_by).
19. Природная среда Беларуси / под ред. В.Ф. Логинова. Минск: НООО «БИП-С», 2002. 424 с.
20. Михалевич Р.В., Наркевич И.П., Конькова В.М., Гончар К.В., Мелех Д.В. Национальный доклад о состоянии окружающей среды Республики Беларусь. Минск: РУП «Бел НИЦ «Экология», 2019. 191 с.
21. Жогло В.Г., Галкин А.Н., Третьякова А.В., Красовская И.А. Пресные подземные воды Гомельской области: динамика и экология. Минск: Беларуская навука, 2018. 176 с.
22. Жогло В.Г., Галкин А.Н., Ковалева А.В. Особенности создания системы инженерной защиты геологической среды от негативных техногенных процессов в районе Гомельского химического завода // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2009. № 4. С. 298–310.
23. Логинов В.Ф., Калинин М.Ю., Иконников В.Ф. Антропогенные воздействия на водные ресурсы Беларуси // Природные ресурсы. 1999. № 3. С. 23–38.
24. Калыска А.О., Бусел А.В. Активация процессов твердения электросталеплавильных шлаков и блокирование ионов тяжелых металлов // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F. Строительство. Прикладные науки. 2015. № 8. С. 83–87.
25. ГОСТ 25100–2011. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2013. 38 с.
26. Ерошина Д.М., Лысухо Н.А., Ракова Ю.С. Лигнин – образование, использование, хранение, воздействие на окружающую среду // Экологический вестник. 2010. № 3 (13). С. 109–118.
27. Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация / под ред. Г.В. Добровольского. Смоленск: Ойкумена, 2003. 268 с.
28. Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е. Полициклические ароматические углеводороды в дорожном покрытии и экраноземах Восточного округа Москвы // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2020. № 2. С. 94–117.
29. Бачура Ю.М., Храмченкова О.М. Почвенные водоросли некоторых антропогенно-нарушенных территорий // Экологический вестник. 2010. № 4 (14). С. 21–28.
30. Заварзин Г.А. Лекции по природоведческой микробиологии. М.: Наука, 2004. 348 с.

31. Каниськин М.А., Семенова Т.А., Терехова В.А. Изменения микробиоты почв под влиянием фосфогипса // Микология и фитопатология. 2009. Т. 43. № 4. С. 317–323.
32. Штина Э.А., Голлербах М.М. Экология почвенных водорослей. М.: Наука, 1976. 143 с.
33. Замотаев И.В., Иванов И.В., Михеев П.В., Никонова А.Н. Химическое загрязнение и трансформация почв в районах добычи углеводородного сырья (обзор литературы) // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1505–1518.
34. Баландина А.В., Еремченко О.З. Микробная ремедиация нефтезагрязненных агродерново-карбонатных почв и техногенных поверхностных образований в подзоне южной тайги: монография. Пермь: ПГНИУ, 2016. 100 с.
35. Исакова Е.А. Особенности воздействия нефти и нефтепродуктов на почвенную биоту // Colloquium-journal. 2019. № 12 (36). С. 7–10.
36. Соловьева Е.С. Экологические особенности актиномицетных комплексов городских почв: автореф. дис. ... канд. бiol. наук. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2015. 22 с.
37. Репортаж с гор химзавода: здесь может вырасти лес или появиться горнолыжная трасса // Onliner.by [веб-сайт]. Дата последнего обращения: 14.04.2025. URL: <https://gomelnews.onliner.by/2013/06/11/fosfogips?ysclid=m99qfymhog929265423>.
38. Гусев А.П. Экологическая сукцессия в техногенном ландшафте // Веснік Віцебскага дзяржаунаага ўніверсітэта. 2002. № 3 (25). С. 134–138.
39. Хотко Э.И. Почвенная фауна Беларуси. Минск: Наука и техника, 1993. 252 с.
40. Khotko L.I. Estimation of industrial pollution influence on Zoocenotic indicators of soil invertebrates in the forests with the purpose of ensuring ecological safety in the region // Journal of International Scientific Publications: Ecology & Safety. 2011. Vol. 5. Part 3. P. 42–77.

## REFERENCES ►

1. Trofimov V.T. Ehkologo-geologicheskaya sistema, ee tipy i polozhenie v strukture ehkosistemy [Ecological-geological system, its types and position in the ecosystem structure] // Vestnik Mosk. un-ta. 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 osobennosti litotopov i inzhenerno-khozyaistvennykh ob'ektorov [Classification of ecological-geological systems of Belarus on the basis of the characteristics of lithotopes and engineering-economic objects] // 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 in 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 lesokhozyaistvennykh ehkologo-geologicheskikh sistem Belorussii [Features of forestry ecological-geological systems in Belarus] // Geoinfo. 2024. T. 6. № 12. S. 6–19. DOI: 10.58339/2949-0677-2024-6-12-6-19 (in Rus.).
5. Korolev V.A., Galkin A.N. Osobennosti prirodnykh ehkologo-geologicheskikh sistem massivov glinistykh gruntov Belorussii [Features of natural ecological-geological systems of clayey soil bodies in Belarus] // Geoinfo. 2023. T. 5. № 9/10. S. 12–21. DOI: 10.58339/2949-0677-2023-5-9/10-12-21 (in Rus.).
6. Korolev V.A., Galkin A.N. Osobennosti sel'skokhozyaistvennykh ehkologo-geologicheskikh sistem Belorussii [Features of agricultural ecological-geological systems in Belarus] // Vestnik MGTU. 2025. T. 28. № 1. S. 49–61 (in Rus.).
7. Korolev V.A., Galkin A.N. Osobennosti ehkologo-geologicheskikh sistem massivov lessovykh gruntov Belorussii [Features of ecological-geological systems of loess soil bodies 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 ehkologo-geologicheskikh sistem massivov torfyanykh gruntov Belorussii [Features of ecological-geological systems of peat soil bodies in Belarus] // Inzhenernaya geologiya. 2024. T. 19. № 1. S. 20–40. DOI: <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2024-19-1-24-44> (in Rus.).
9. Korolev V.A., Galkin A.N. Prirodnye ehkologo-geologicheskie sistemy massivov peschanykh gruntov Belorussii [Natural ecological-geological systems of sandy soil bodies 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.).
10. Valyal'shchikov A.A., Il'yash V.V., Kosinova I.I., Silkin K.Yu., Starodubtsev V.S. Kurs lektsii dlya podgotovki k gosudarstvennomu ehkzamenu po ehkologicheskoi geologii [Course of lectures to prepare for the environmental geology state exam]. Voronezh: IPTS VGU, 2016. 140 s. (in Rus.).
11. Galkin A.N., Korolev V.A. Osobennosti funktsionirovaniya litotekhnicheskikh sistem territorii Belorussii [Features of functioning lithotechnical systems in the territory of Belarus] // Inzhenernaya geologiya. 2014. № 4. S. 28–44 (in Rus.).
12. OAO «Belorusskii metallurgicheskii zavod» [Belarusian Metallurgical Plant OJSC] // FullTeam.by [website]. Data poslednego obrashcheniya: 07.04.2025. URL: <https://eae.by/projects/shinoprovod/oao-beloruskiy-metallurgicheskiy-zavod/> (in Rus.).
13. Prognoz sostoyaniya prirodnoi sredy Belarusi na period do 2035 goda [Forecast of the state of the natural environment of Belarus for the period up to 2035] / pod obshch. red. V.S. Khomicha. Minsk : Belaruskaya navuka, 2022. 331 s. (in Rus.).
14. Prognoz izmeneniya okruzhayushchei sredy Belarusi na 2010–2020 gg. [Forecast of changes in the environment of Belarus for 2010–2020] / pod red. V.F. Loginova. Minsk: Minskippunkt, 2004. 180 s. (in Rus.).



15. Natsional'naya sistema monitoringa okruzhayushchei sredy Respubliki Belarus': rezul'taty nablyudenii, 2010 [National environmental monitoring system of the Republic of Belarus: observation results, 2010] / pod obshch. red. S.I. Kuz'mina, V.V. Savchenko. Minsk: RUP «Bel Nits «Ehkologiya», 2011. 308 s. (in Rus.).
16. Natsional'nyi doklad o sostoyanii okruzhayushchei sredy Respubliki Belarus' za 2019–2022 gody [National report on the state of the environment of the Republic of Belarus for 2019–2022]. Minsk, 2023. 172 s. (in Rus.).
17. Galkin A.N., Akulevich A.F., Pavlovskii A.I., Galeznik O.I. Tekhnogenennye grunty [Technogenic Soils]. Minsk: Vyshehishaya shkola, 2020. 192 s. (in Rus.).
18. Dvortsy, priroda i mnogo drevnostei. Chto posmotret' na Gomel'shhine v Belarusi? [Palaces, Nature and Many Antiquities. What to See in the Gomel Region in Belarus?] // Planetabelarus.by [website]. Data poslednego obrashcheniya: 07.04.2025. URL: [https://dzen.ru/planetabelarus\\_by](https://dzen.ru/planetabelarus_by).
19. Prirodnaia sreda Belarusi [Natural Environment of Belarus] / pod red. V.F. Loginova. Minsk: NOOOO «BIP-S», 2002. 424 s. (in Rus.).
20. Mikhalevich R.V., Narkevich I.P., Kon'kova V.M., Gonchar K.V., Melekh D.V. Natsional'nyi doklad o sostoyanii okruzhayushchei sredy Respubliki Belarus' [National Report on the State of the Environment of the Republic of Belarus]. Minsk: RUP «Bel Nits «EhkologiyaYA», 2019. 191 s. (in Rus.).
21. Zhoglo V.G., Galkin A.N., Tret'yakova A.V., Krasovskaya I.A. Presnye podzemnye vody Gomel'skoi oblasti: dinamika i ehkologiya [Fresh groundwater of the Gomel region: the dynamics and ecology]. Minsk: Belaruskaya navuka, 2018. 176 s. (in Rus.).
22. Zhoglo V.G., Galkin A.N., Kovaleva A.V. Osobennosti sozdaniya sistemy inzhenernoi zashchity geologicheskoi sredy ot negativnykh tekhnogenennykh protsessov v raione Gomel'skogo khimicheskogo zavoda [Features of creating a system of engineering protection of the geological environment against negative anthropogenic processes in the area of the Gomel Chemical Plant] // Geohkologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya. 2009. № 4. S. 298–310 (in Rus.).
23. Loginov V.F., Kalinin M.YU., Ikonnikov V.F. Antropogennye vozdeistviya na vodnye resursy Belarusi [Anthropogenic impacts on the water resources of Belarus] // Prirodnye resursy. 1999. № 3. S. 23–38 (in Rus.).
24. Kalyska A.O., Busel A.V. Aktivatsiya protsessov tverdeniya ehlektrostaleplavil'nykh shlakov i blokirovaniye ionov tyazhelykh metallov [Activizing the hardening processes of electric steelmaking slags and blocking heavy metal ions] // Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. 2015. № 8. S. 83–87 (in Rus.).
25. GOST 25100–2011. Grunty. Klassifikatsiya [Grounds. Classification]. M.: Standartinform, 2013. 38 s. (in Rus.).
26. Eroshina D.M., Lysukho N.A., Rakova Yu.S. Lignin – obrazovanie, ispol'zovanie, khranenie, vozdeistvie na okruzhayushchuyu sredu [Lignin: the formation, use, storage, influence on the environment] // Ehkologicheskii vestnik. 2010. № 3 (13). S. 109–118 (in Rus.).
27. Gerasimova M.I., Stroganova M.N., Mozharov N.V., Prokof'eva T.V. Antropogennye pochvy: genezis, geografiya, rekul'tivatsiya [Anthropogenic soils: the genesis, geography, reclamation] / pod red. G.V. Dobrovolskogo. Smolensk: Oikumena, 2003. 268 s. (in Rus.).
28. Nikiforova E.M., Kosheleva N.E. Politsiklicheskie aromaticheskie uglevodorody v dorozhnom pokrytiu i ehkranozemakh Vostochnogo okruga Moskvy [Polycyclic aromatic hydrocarbons in the roadway covering and screen soils in the Eastern District of Moscow] // Vestnik PNIPU. Prikladnaya ehkologiya. Urbanistika. 2020. № 2. S. 94–117 (in Rus.).
29. Bachura YU.M., Khramchenkova O.M. Pochvennye vodorosli nekotorykh antropogenno-narushennykh territorii [Soil algae of some anthropogenically disturbed territories] // Ehkologicheskii vestnik. 2010. № 4 (14). S. 21–28 (in Rus.).
30. Zavarzin G.A. Lektsii po prirodovedcheskoi mikrobiologii [Lectures on naturalistic microbiology]. M.: Nauka, 2004. 348 s. (in Rus.).
31. Kanis'kin M.A., Semenova T.A., Terekhova V.A. Izmeneniya mikobiotsy pochv pod vliyaniem fosfogipsa [Changes in the mycobiota of soils under the influence of phosphogypsum] // Mikologiya i fitopatologiya. 2009. T. 43. № 4. S. 317–323 (in Rus.).
32. Shtina Eh.A., Gollerbach M.M. Ehkologiya pochvennykh vodoroslei [Ecology of soil algae]. M.: Nauka, 1976. 143 s. (in Rus.).
33. Zamotaev I.V., Ivanov I.V., Mikheev P.V., Nikonova A.N. Khimicheskoe zagryaznenie i transformatsiya pochv v raionakh dobychi uglevodordnogo syr'ya (obzor literature) [Chemical pollution and transformation of soils in areas of hydrocarbon raw materials extraction (literature review)] // Pochvovedenie. 2015. № 12. S. 1505–1518 (in Rus.).
34. Balandina A.V., Eremchenko O.Z. Mikrobnaya remediatsiya neftezagryaznennykh agrodernov-karbonatnykh pochv i tekhnogenennykh poverkhnostnykh obrazovanii v podzone yuzhnoi taigi: monografiya [Microbial remediation of oil-contaminated agrodernum-carbonate soils and technogenic surface formations in the southern taiga subzone: monograph]. Perm': PGNIU, 2016. 100 s. (in Rus.).
35. Isakova E.A. Osobennosti vozdeistviya nefti i nefteproduktov na pochvennyu biotu [Features of the influence of oil and oil products on soil biota] // Colloquium-journal. 2019. № 12 (36). S. 7–10 (in Rus.).
36. Solov'eva E.S. Ehkologicheskie osobennosti aktinomisetnykh kompleksov gorodskikh pochv: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk [Ecological features of actinomycete complexes of urban soils: author's abstract of a thesis for the degree of PhD in Biology]. Perm': Perm'. gos. nats. issled. un-t, 2015. 22 s. (in Rus.).
37. Reportazh s gor khimzavoda: zdes' mozhet vyrasti les ili poyavit'sya gornolyzhnaya trassa [Report from the mountains of a chemical plant: a forest or a ski slope may appear there] // Onliner.by [veb-sait]. Data poslednego obrashcheniya: 14.04.2025. URL: <https://gomelnews.onliner.by/2013/06/11/fosfogips?ysclid=m99qfymhog 929265423> (in Rus.).
38. Gusev A.P. Ehkologicheskaya suktsessiya v tekhnogennom landshafte [Ecological succession in a technogenic landscape] // Vesnik Vitsebskaga dzyarzauna universitehta. 2002. № 3 (25). S. 134–138 (in Rus.).
39. Khot'ko EH.I. Pochvennaya fauna Belarusi [Soil fauna of Belarus]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1993. 252 s. (in Rus.).
40. Khotko L.I. Estimation of industrial pollution influence on Zoocenotic indicators of soil invertebrates in the forests with the purpose of ensuring ecological safety in the region // Journal of International Scientific Publications: Ecology & Safety. 2011. Vol. 5. Part 3. R. 42–77 (in Eng.).