

УДК 55:502:338:502.171(575.3)

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-5-164-174

## РЕСУРСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАССИВОВ НАМЫВНЫХ ГРУНТОВ

Виктор Титович Трофимов<sup>1</sup>, Татьяна Анатольевна Барабошкина<sup>2</sup>,  
Светлана Казимировна Николаева<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; trofimov@rector.msu.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; baraboshkina@mail.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-7209-5905>

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; nikolaeva.sk@gmail.com

**Аннотация.** Проанализированы специфические особенности эколого-геологических систем массивов намывных грунтов и их абиотических и биотических компонентов. Выявлены особенности взаимосвязи компонентов друг с другом, формирующие специфический ресурсный потенциал. Приведены и систематизированы данные по опыту реабилитации территорий распространения массивов техногенных грунтов для различных видов хозяйственной деятельности.

**Ключевые слова:** намывные грунты, эколого-геологическая система, литотоп, фитоценоз, ресурсный потенциал

**Для цитирования:** Трофимов В.Т., Барабошкина Т.А., Николаева С.К. Ресурсный потенциал эколого-геологических систем массивов намывных грунтов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 5. С. 164–174.

## RESOURCE POTENTIAL OF ECOLOGICAL-GEOLOGICAL SYSTEMS OF ALLUVIAL SOIL ARRAYS

Viktor T. Trofimov<sup>1</sup>, Tatyana A. Baraboshkina<sup>2</sup>, Svetlana K. Nikolaeva<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; trofimov@rector.msu.ru

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; baraboshkina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7209-5905>

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; nikolaeva.sk@gmail.com

**Abstract.** The specific features of ecological and geological systems of alluvial soil arrays and their abiotic and biotic components are analyzed. The features of the interrelation of the components with each other, which determine the resource potential of these EGDS, are revealed. The data on the experience of rehabilitation of similar territories for various types of economic activity are systematized.

**Keywords:** alluvial soils, ecological and geological system, lithotope, phytocenosis, resource potential

**For citation:** Trofimov V.T., Baraboshkina T.A., Nikolaeva S.K. Resource potential of ecological and geological systems of alluvial soil arrays. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 5: 164–174. (In Russ.).

**Введение.** В экологически ориентированных работах середины XX века широко используется понятие «биогеоценоз» В.Н. Сукачева, а в последние 40 лет — понятие «экосистемы». В этих систематиках выделяются «биоценоз» и «экоотоп», которые функционально связаны друг с другом. Однако в данных подходах, с нашей точки зрения, минимизирован анализ влияния геологических условий на существование живого. А между тем, именно на поверхности грунтовых массивов или верхней части геологических разрезов функционирует практически вся биота континентальных структур Земли.

В ряде публикаций XXI века [Трофимов, 2009, 2010] литосфера рассматривается как «литотоп» экосистемы. Основные его компоненты: 1 — состав, строение, состояние и рельеф геологического массива; 2 — подземные воды; 3 — геохимические поля; 4 — геофизические поля; 5 — современные

эндо- и экзогенные процессы. Исходя из данного подхода *эколого-геологическая система* — это определенный (любой по размерам) объем литосферы с функционирующей непосредственно в нем или на его поверхности биотой, включая человека и социум [Трофимов, 2009, 2010].

Эколого-геологической системой (ЭГС) массивов намывных грунтов называется антропогенно созданный массив литотопа, представленный намывными грунтами, развитыми на них техноземами, а также сформировавшимися на них специфическими техноприродными биоценозами, состоящими из микробоценоза, фитоценоза и зооценоза.

Данный тип ЭГС относится к техногенным (антропогенным или искусственным) элементарного уровня. Среди литотопов массивов намывных грунтов выделяется два вида: 1) литотоп массивов дисперсных намывных грунтов и 2) литотоп массивов

вов дисперсных грунтов хвостохранилищ и шламо-накопителей [Королев, Трофимов, 2022].

Исходя из зонально-климатических условий, в эпоху четвертой энергоемкой промышленной революции, наряду с внедрением возобновляемой «зеленой» энергии, сохраняется тенденция использования природного углеводородного сырья (уголь, торф, сланцы). Наибольшее распространение на территории бывшего союзного государства в районах теплоэлектростанций получил способ гидравлического удаления и складирования золошлаков — продуктов сгорания твердых видов топлива.

Предприятия горнодобывающей и перерабатывающей промышленности, объекты энергетики РФ занимают площади порядка 2,7 млн га. Более 40% в структуре нарушенных земель составляют территории разработки полезных ископаемых, в том числе намывные гидроотвалы и хвостохранилища (более 1200 тыс. га нарушенных земель) [Анализ..., 2013; Абакумова и др., 2021].

В соответствии с ГОСТ 25100-2020 намывные грунты выделяются в группе техногенных грунтов, перемещенных (подтип) посредством гидронамыва (вид) в гидроотвал (подвид 1) либо в тело земляных сооружений (подвид 2) с использованием средств гидромеханизации [ГОСТ 25100, 2020]. Намывные массивы грунтов формируют техногенный рельеф и могут быть образованы любыми дисперсными грунтами либо вторичными (побочными) продуктами хозяйственной деятельности.

«Ресурсная экологическая функция литосферы определяет роль минеральных, органических и органоминеральных ресурсов и геологического пространства литосферы для жизни и деятельности биоты как в качестве биогеоценоза, так и социальной структуры» [Экологические..., 2000; Трофимов, 2010]. Массивы намывных грунтов можно рассматривать в качестве ресурса геологического пространства, необходимого для расселения и существования биоты (например, при рекультивации), как место складирования отходов (потенциально перспективных для вторичного извлечения полезных компонентов), земляные инженерные сооружения, используемые в хозяйственной деятельности и др.

Ресурсы геологического пространства, как известно, характеризуются двумя показателями — ресурсным потенциалом и качеством ресурса геологического пространства. Под ресурсным потенциалом понимается совокупность всех перспективных возможностей освоения данного объема геологического пространства [Экологические..., 2000]. Поэтому *ресурсный потенциал эколого-геологических систем массивов намывных грунтов* можно представить, как совокупность объема, состава, строения и свойств массивов намывных грунтов, определяющих их качество как ресурса.

Массивы намывных грунтов — сложные гидротехнические сооружения, создаваемые по специальным многоэтапным технологиям. Особенностью

процесса формирования литотопа ЭГС техногенных массивов является серия технологических этапов и воздействий, к основным из них можно отнести: 1) добыча углеводородов на месторождении; 2) термические превращения углеводородного сырья в топках электростанций; 3) процесс извлечения и прокачки по пульпопроводу золошлаковых материалов в виде золовой, шлаковой или золошлаковой пульпы; 4) подача пульпы багерными насосами на гидрозолоотвал; 5) дифференциация материала на отвале — осаждение золошлаков и осветление транспортирующей воды.

По составу и строению намывные образования в районах тепловых и энергетических объектов, горно-добывающих предприятий, формирующие абиотический компонент эколого-геологической системы (мощностью до 50 м и выше), имеют вертикальную и площадную дифференциацию гранулометрического, минерального, геохимического состава и свойств. Для эколого-геологических систем, формирующихся на современном техногенном этапе развития экологических функций литосферы в районах гидронамыва, типично присутствие в верхней абиотической части ЭГС намывных материалов, вторичных продуктов энергетического или горно-добывающего сектора экономики, что предопределяет их ресурсный потенциал и особенности рекультивации.

**Ресурсные особенности литотопа эколого-геологических систем массивов намывных грунтов.** *Гидрозолоотвалы — гидротехнические сооружения, предназначенные для организованного складирования отходов сжигания твердого топлива.* С экономической точки зрения — это накопители вторичных материальных ресурсов. Их конструкция и тип предопределены видом и способом складирования, методом образования емкости для заполнения, местоположением в технологической цепи, рельефом местности, количеством секций золоотвала. В зависимости от принятого варианта удаления золошлаковых отходов (раздельное или совместное удаление и складирование золы и шлака) выделяют золоотвалы, шлакоотвалы и золошлакоотвалы [Воронкевич, 2015; Николаева и др., 2012; Огородникова и др., 2013; Сысоев, Барабошкина, 1997; Трофимов и др., 2006].

По высоте они могут быть низкие (не более 5 м), средние (до 25 м), высокие до 50 м и более; по механическому составу — мелкопылеватые или крупнопесчаные с размером частиц до 10–50 мкм — 1 мм соответственно. Зольные отложения обычно представлены субстратами светло- или темно-серого цвета, иногда с темными прослойками несгоревших угольных частиц. По механическому составу зола представлена фракциями песка и пыли, которые не содержат в доступной форме элементов питания растений, что позволяет отнести золу по солевому режиму к бедным субстратам. По валовому химическому составу зола углей в общих чертах соответ-

ствуется алюмосиликатным образованиям [Чибрик и др., 2011].

Преимущественно в центральной части гидрозолоотвалов располагается пруд-отстойник, в котором идет осветление воды и дифференциация золошлакового материала. В процессе техногенного седиментогенеза формируется зона сброса пульпы с преобладанием шлаковых фракций (размером более 0,25 мм); промежуточная (пляжная) зона с преобладанием зольных частиц (размером менее 0,25 мм); зона пруда-отстойника в пределах которой почти отсутствуют шлаковые фракции, и имеет место вертикальная дифференциация намываемого материала [Огородникова и др., 2013; Экологические..., 2000]<sup>1</sup>.

При фильтрационных процессах в массивах намывных грунтов происходит интенсивный массоперенос за счет как поверхностного, так и подземного стока. Интенсивное перемешивание золы с водой в трубопроводе и на пляже намыва приводит к насыщению водной среды спектром растворимых токсичных веществ.

При наличии оборотных систем эти вещества накапливаются в растворе, достигая предельного насыщения. Однако технологически система гидрозолоудаления требует периодических сбросов, обусловленных либо накоплением веществ, препятствующих нормальному функционированию оборотной системы, либо переполнением вмещающей емкости системы при интенсивных атмосферных осадках, часто наблюдаемых в климатических зонах с избыточным увлажнением, характеризующихся преобладанием осадков над испарением.

Водопроницаемость золы в 5–8 раз выше, чем подзолистых почв. Реакция среды золы углей колеблется от 5,9 до 8,5 рН (от слабокислой до щелочной). Зола углей обладает небольшой емкостью поглощения, аналогичной легким почвам, что объясняется ее обедненностью высокодисперсными органическими веществами и глинистыми частицами. Поглотительная способность верхних слоев толщи гидрозолоотвалов потенциально может быть увеличена посредством внесения золы торфа, почвы, минеральных удобрений, полива сточными водами [Панин, Ковалев, 1970].

Спектральный анализ показал присутствие в золе углей до 30 различных макро- и микроэлементов, многие из которых жизненно необходимы для биоты. Широкими ассоциациями накапливающихся элементов и наиболее высокими их концентрациями отличается зола углей Подмосковного (Be, B, Zn, Zr, Nb, Mo, Ag, Sn, Pb) и Иркутского (Li, Be, B, Ge, Mo, Sn, W, Pb) бассейнов. Более бедны микроэлементами

угли Канско-Ачинского (B, Zn, Sr) и Кузнецкого (B, Zn, Mo, Pb) бассейнов [Намывные..., 2014].

Исследования микроэлементного состава намывных массивов зол, формирующих техногенные литотопы Средней Сибири, методом рентгеноспектрального анализа показали, что в них проявляются более 20 различных элементов, из которых постоянно присутствуют только 13: V, Cr, Ti, Pb, Cu, Ba, Sr, Li, Mo, Zn, Co, Ni, Mn [Целюк, 2009].

В результате обработки большого массива данных выделено две группы зольных литотопов. *Первая группа* представлена золами из золоотвалов Красноярских ТЭЦ, Назаровской государственной районной электростанции (ГРЭС), Абаканской теплоэлектроцентрали (ТЭЦ). Для них типичны три ассоциации: Co-Ni-Mn; Ti-V-Cr; Pb-Zn. *Вторая группа* представлена золами, размещаемыми в золоотвале Березовской ГРЭС, и включает следующие ассоциации: V-Ti-Cr-Pb; Co-Cu; Zn-Ni [Целюк, 2009].

На большинстве массивов гидрозолоотвалов синхронно с дифференциацией гранулометрического, минерального состава по латерали идет и вертикальная гравитационная дифференциация микроэлементов по глубине. На контакте зольных отложениях с подстилающими грунтами, фиксируется максимум валового накопления Ba, Sr, Li, Ti, V, Cr, Co, Ni, Mn, Mo. Вниз по разрезу, с переходом в подстилающие суглинки валовое содержание большинства элементов снижается, за исключением Pb, Cu, V, Zn [Огородникова и др., 2011; Юдович, Кетрис, 2005].

Первичные ассоциации геохимических элементов, охарактеризованные выше и присущие верхним частям разреза, преобразуются в новые ассоциации в горизонте вторичного преобразования зол на глубине 10–11 м. *Первая ассоциация* представлена V-Ba-Mn-Zn-Pb, *вторая* — Sr-Co-Ni-Cu-Ti, а *третья* — Cr-Mo-Li. По сути, все перечисленные ассоциации являются потенциальными факторами риска изменения качества водных ресурсов региона вследствие обводненности заполняемых секций или инфильтрации дождевых осадков старых отвалов [Юдович, Кетрис, 2005].

В составе намывных грунтов присутствуют отдельные элементы или их сочетания, которые отсутствуют в природных минералогических ассоциациях, физико-химические характеристики также существенно отличаются как от сжигаемого топлива, так и от величин их кларковых концентраций в земной коре (табл. 1).

Поведение химических элементов, входящих в состав геохимических ассоциаций, по глубине разреза не однотипно. Ряд элементов характеризуется ростом концентраций в основании зольных массивов, а другие элементы распределены равномерно по разрезу толщи зол.

Интенсивность взаимодействия *техногенных вод гидрозолоотвала и грунтовых вод* анализировалась на основе степени накопления элементов-мар-

<sup>1</sup> Целесообразно выполнять обследование данных зон как на предмет наличия токсичных элементов, так и с позиции формирования потенциального намывного техногенного месторождения полезных ископаемых, а при отсутствии ценных компонентов для промышленного использования, рационально подбирать лесные или иные культуры с целью решения задачи их биологической рекультивации.

Таблица 1

Среднее содержание некоторых химических элементов в золе углей, г/т [Юдович, Кетрис, 2005]

Элемент	Угли СССР	Угли мира по [Юдович, 2005]		Земная кора по [Виноградов, 1932]
		бурые	каменные	
Бериллий	5	11	21	3,8
Бор	190	560	680	12
Титан	6600	2600	4600	4500
Ванадий	120	120	180	90
Медь	65	48	80	47
Цинк	142	100	150	83
Стронций	410	1100	460	340
Цирконий	270	160	250	170
Молибден	7	13	25	U
Олово	4	4,1	7,5	2,5
Барий	830	890	930	650
Свинец	36	53	170	16

керов в водоносном горизонте. По данным расчета коэффициентов концентрации исследователями установлено, что максимальной степенью накопления в водной среде имеет ассоциация V-Ba-Mn-Pb, превышая показатель накопления ассоциации Sr-Co-Ni-Cu-Ti в два раза. Уровень накопления элементов первой ассоциации (V, Ba, Mn, Pb) по суммарному показателю по форме и контуру четко отражает фильтрационный купол растекания техногенных вод. Суммарный показатель второй ассоциации (Sr, Co, Ni, Cu, Ti) не имеет четких контуров, сопоставимых с границами купола фильтрации техногенных вод в подземный водоносный горизонт. Третья выделенная ассоциация (Cr, Mo, Li) имеет минимальный суммарный показатель и равномерно распределена по всей площади в районе золоотвала.

Водный режим золоотвалов во многом зависит от их географической приуроченности. В таежной зоне, где осадков выпадает 500–600 мм в год (местоположение Верхнетагильской ГРЭС), полевая влажность в вегетационный период колебалась от 4 до 37% в слое 0–5 см и от 20 до 45% в слое 20–40 см; в лесостепной зоне, где осадков выпадает до 350 мм в год (район расположения золоотвала Южноуральской ГРЭС), параметры влажности изменялись от 0,4–25 до 17–30% (вниз по компонентам ЭГС). Атмосферные осадки полностью поглощаются золой, пополняя внутренние запасы влаги в толще золоотвалов [Пасынкова, 1974].

В процессе термической переработки, транспортировки, намыва и хранения на золоотвале происходит изменение минерального состава зол, что обуславливает формирование подвижных соединений и загрязнение компонентов ЭГС сопредельных территорий. Особенно отчетливо преобразования состава и свойств новых образований проявляются в активных золах. Это связано с процессом склади-

рования пульпы, последующими процессами взаимодействия активных компонентов между собой, а также с атмосферой и природными водами.

Намывные гидрозолоотвалы Среднеуральской государственной районной электростанции (ГРЭС), Верхнетагильской и Южноуральской ГРЭС крайне бедны азотом (практически его не содержат), зола золоотвала Южноуральской ГРЭС содержит мало подвижных форм P и K, у золы золоотвала Верхнетагильской ГРЭС достаточно высокое обеспечение подвижными фосфатами и низкое обеспечение калием. Реакция среды слабощелочная. Содержание микроэлементов превышает средние концентрации в почве. Физический и химический состав золы, значительная ее влагоемкость и влажность, особый температурный режим, бесструктурность делают золу специфическим техногенным субстратом, не имеющим аналогов в природе. Некоторые авторы [Дайбо, 1969; Огородникова, Николаева, 2004; Holliday et al., 1955], фиксируя в золе значимые количества Al, Mn, Fe, Ni, указывают, что это влияет на рост растений, вызывает у них изменение окраски листьев (пурпурные пятна) и повышенную ломкость стеблей, увеличение названных элементов в тканях растений. Зола от сжигания углей является слаботеплопроводным субстратом, имеющим значительную амплитуду колебаний температуры на поверхности и в глубине. Разность температур на глубине 5 см от поверхности может достигать 10–16 °С. На большей глубине тепловая волна затухает и изменение температуры идет плавно. Плохая теплоотдача в глубине толщи золы связана с сухостью и рыхлым состоянием верхнего слоя и более высокой влажностью нижних слоев [Пикалова, 1966].

Горно-обогащительные комбинаты (ГОК) черной металлургии РФ эксплуатируют порядка 35 крупных хвостохранилищ, вмещающих свыше 2,5 млрд м<sup>3</sup> техногенного грунта. Их площадь велика (табл. 2), только на железорудных ГОКах они составляют 25–30% от площади земельного отвода. Общие площади земель, подлежащие рекультивации на ряде горных предприятий, достигают 9–10 тыс. га [Анализ..., 2013]. На предприятиях Курской магнитной аномалии (КМА) площадь намывных техногенных

Таблица 2

Параметры хвостохранилищ ряда ГОКов черной металлургии России [Анализ..., 2013]

Горнообогащительный комбинат	Площадь хранилища, га	Проектная высота ограждающих дамб, м	Вместимость на конец эксплуатации, млн м <sup>3</sup>	Общий выход хвостов, млн м <sup>3</sup> в год
Оленегорский	1000	55	400	6,37
Ковдорский	770	6,5	315	5,07
Костомукшский	3410	22,3	410	10,0
Михайловский	2250	52	350	12,32
Лебединский	1080	94,5	567	19,35

массивов хвостохранилищ превышает 5000 га. Объем складированных вторичных ресурсов достигает порядка 800 млн м<sup>3</sup>, т. е. из сельскохозяйственного оборота отчуждены значительные площади земельных ресурсов [Анализ..., 2013; Пасынкова, 1974; Трофимов и др., 2006].

Хвостохранилища намывного типа создаются в районах *горного производства*, наиболее крупные комплексы которого сконцентрированы в 7 из 15 районов страны с неблагоприятной экологической обстановкой; в 5 из них добыча совмещена с переработкой минерального сырья. В ряде районов Урала и Кузбасса она вносит существенный вклад в загрязнение и деградацию природной среды. Тяжелая обстановка сложилась в Центральном и Центрально-Черноземном экономических районах, Кольском полуострове, в Прикаспии, Приангарье, Норильском районе [Анализ..., 2013].

Важным фактором воздействия, оказывающим существенное влияние на формирование литотопов в районах хвостохранилищ, как и при создании золоотвалов, является технология гидравлической укладки отходов обогащения. При воздействии гидравлической энергии водного потока происходит фракционирование частиц хвостов и их дифференциация по крупности и удельному весу различных минералов, включая гематит, магнетит, кварц и других составляющих. Самые крупные и тяжелые частицы выпадают вблизи мест выпуска пульпы и формируют на хвостохранилище так называемую зону слива или выпуска пульпы. Эта зона распространяется до 50 м, на ней откладываются наиболее крупные и плотные фракции хвостов, которые и используют для формирования дамб. Средние по размерам частицы формируют промежуточную зону (100–150 м), а самые мелкие и легкие потоком воды сносятся в центральную зону и покрываются водой. Лабораторными исследованиями и экспериментами было установлено, что на расстоянии 350 м от выпуска твердые частицы хвостов при ламинарном течении пульпы в прудковой зоне осаждаются на 99%. Далее вода практически чистая и пригодна для оборотного водоснабжения.

Таким образом, на хвостохранилище механический состав дифференцирован от зоны выпуска пульпы к центральной зоне, варьирует вниз по профилю, особенно в промежуточной и центральной зонах. Так, в центральной зоне механический состав колеблется от супеси до суглинка тяжелого. К другой особенности отходов обогащения хвостохранилища относится очень малое содержание частиц глинистой фракции. Ее содержание закономерно увеличивается от зоны выпуска пульпы 2,4% к центральной зоне — 8,0%. Незначительное содержание в составе отходов обогащения хвостохранилища глинисто-коллоидных частиц является одной из основных причин отсутствия адгезионных сил и слабой связанности хвостов.

Хвосты, складированные в хвостохранилища железорудных комбинатов, содержат магнетит, гематит, кварцевые сростки. Как правило, микровключения железосодержащих минералов присутствуют во всех гранулометрических фракциях хвостов.

Наиболее распространенные загрязнители рудничных вод — соединения хлора и свободная серная кислота, которой часто сопутствуют растворимые соли, главным образом, сульфаты Fe, Cu, Zn, Mn, Ni и др. По хлористым и сернистым соединениям, а также концентрации Ca, Mg, Na, K рудничные воды превосходят даже техническую воду в 5–15 раз. Концентрирование тяжелых металлов, мышьяка, селена и др. (Cd, Ni, Mn, Hg, Pb и др.) в почвах или водной компоненте ЭГС хвостохранилищ — потенциальный фактор риска для биоты [Анализ... 2013; Барабошкина, Огородникова, 2014].

Хвостохранилища намывного типа периодически имеют сухие пляжи, обычно склонные к пылению. При этом повышение уровня воды, с одной стороны, приводит к затоплению площади пляжей, а с другой стороны, это приводит к расходу воды и изменению гидрогеологического режима в массивах хвостохранилищ на сопредельных ЭГС.

Длительный комплекс исследований по снижению техногенной нагрузки на гидросферу выполнялся творческим коллективом под руководством А.М. Гальперина в применении к эколого-геологическим условиям Лебединского горно-обогатительного комбината (ГОК), где шла модернизация объединенного гидроотвально-хвостового хозяйства с целью создания рационального складирования хвостов и снижения безвозвратных потерь воды из хвостохранилища. Был разработан метод посекционного заполнения хвостохранилища с объединением прудов-осветлителей гидроотвала и хвостохранилища [Гальперин и др., 2006; Гальперин и др., 2012].

Для гидроотвально-хвостового хозяйства Лебединского ГОКа была создана единая система оборотного водоснабжения как для технологии обогащения и окомкования, так и гидровскрешных работ в карьере. В результате для сельскохозяйственного использования сохранено 2000 га пахотных земель [Анализ..., 2013; Экологические ..., 2002].

Для техногенных массивов намывных грунтов характерны процессы, обусловленные как литогенетическими преобразованиями их состава и свойств, что соответствует природным процессам прогрессивного и регрессивного литогенеза, так и экзогенными процессами — суффозия, оползнеобразование, дефляция и др. Ветровая эрозия максимально проявляется в пляжевых зонах при отсутствии пылеподавляющих мероприятий. На железорудных комплексах источник загрязнения классифицируется как пыль неорганическая, содержащая 20–70% двуокиси кремния, выбрасываемой в атмосферу, по следующим вариантам: пыление с поверхностей гребней и откосов плотины защиты

отвалов и головной плотины; пыление с пляжных зон хвостохранилища.

Первый источник пыления может быть устранен на долгосрочный период времени путем укрепления поверхности, нанесения плодородной земли и засева растительностью. Второй источник пыления — пляжные зоны. Он является постоянно действующим и определяется технологией формирования намывного хвостохранилища. К примеру, для хвостохранилища Стойленского ГОКа площадь пылящих поверхностей первого источника составляет 8,4 га, а для второго — 58,4 га, то есть подавляющее количество пыли выделяется именно с пляжей, и этот фактор особенно проявляется в засушливый период. В частности, количество загрязненного вещества, отходящего от источника пыления, составляет 140 т/год по первому варианту и 980 т/год — по второму варианту [Немировский, 2014].

В нормальных условиях концентрации пыли за пределами санитарной зоны хвостохранилища ниже ПДК, а в случае высоких ветровых нагрузок, в сухую погоду, концентрация пыли может превышать ПДК, и такая экологическая нагрузка на окружающую среду создает проблему, требующую эффективного решения для минимизации факторов негативного воздействия техногенных ЭГС на природные, сопряженные с ними компоненты экогеосистем.

Из факторов, лимитирующих рост и развитие растений на зольном субстрате, основным является низкое содержание органических соединений и элементов минерального питания (N, K) в доступной для растений форме [Серая, Шубин, 1976].

**Ресурсные особенности биокосных и биотических компонентов эколого-геологических систем массивов намывных грунтов.** Отличительной особенностью «свежей» золы гидрозолаотвала как *эдафотоп* ЭГС является тот факт, что *микробиологическая деятельность крайне низка и развитие бактерий практически не происходит*. В связи с этим превращение питательных веществ идет крайне медленно. Одной из причин слабой в микробиоценозах деятельности является щелочная среда золы, препятствующая развитию основных физиологических групп микроорганизмов [Чибрик и др., 2011]. Данный фактор способствует тому, что фитоценозы в пределах массивов намывных техногенных грунтов формируются самозаращением крайне медленно. Структурно-динамическая организация культурфитоценозов<sup>1</sup> намывных массивов специфична и за-

висит от эдафических и зонально-климатических условий, способа рекультивации, агротехнических мероприятий, направления и способа дальнейшего хозяйственного использования территории намывных массивов [Создание..., 2019].

Растительные сообщества и их адаптация с грибами — микориза<sup>2</sup> является важным фактором приспособления растений к условиям экстремальной среды эдафотоп [Селиванов, 1981; Шкараба, 1983]. Согласно анализу опубликованных данных исследователями установлено [Чибрик, 2002], что доля микотрофных видов в 20–50-летних растительных сообществах варьирует от 60 до 100%. Подавляющее большинство видов являются слабомикотрофными. Однако показатели микотрофности на нарушенных землях ниже, чем в естественных растительных сообществах.

Преобладание слабомикотрофных видов характерно для большинства сообществ, формирующихся на техногенных объектах Среднего Урала [Чибрик, 2002]. Это свидетельствует об экстремальности экологических, в том числе эдафических, условий [Логонова, Ивашкина, 1985]. Интенсивность микоризообразования меняется в процессе онтогенеза и зависит как от возрастного состояния особей, так и от свойств субстрата.

Исследования динамики микоризообразования на золоотвалах в разных зонально-климатических условиях, проведенные в течение 25 лет, начиная с 5-летних растительных сообществ [Лукина, 2007; Лукина и др., 2008], показали, что с возрастом происходит увеличение доли микотрофных видов в растительных сообществах.

Микоризообразующие грибы, связывая в единый комплекс субстрат и растения, являются не только важным экологическим фактором индивидуального развития растений, но и способствуют повышению устойчивости и степени сформированности биогеоценозов на трансформированных землях.

**Особенности фитоценоза.** В результате осуществления локального мониторинга (более 55 лет) сотрудниками Уральского государственного университета им. А.М. Горького прослежена динамика видового состава растений, формирующегося на промышленных отвалах с учетом времени их образования и результатов по биологической рекультивации нарушенных земель [Чибрик, 2005; Создание..., 2019]. Исследование структурно-динамической организации сериальных фитоценозов на золоотвалах Верхнетагильской ГРЭС и Среднеуральской ГРЭС проводилось на видовом и ценопопуляционном уровнях, а функциональной структуры — на примере микосимбиотических связей. Данные этих исследований будут приведены далее при описании эколого-геологических систем конкретных массивов намывных грунтов, а здесь подчеркнем две позиции.

<sup>1</sup> Термин «культурфитоценоз» предложил лесовед Ю.П. Бяллович. Под ним он понимал «определенную культуру, рассматриваемую как совокупность растений, характеризующуюся определенными взаимоотношениями между растениями и между растениями и средой, возникающими в результате наложений реакций ландшафта и борьбы за существование на комплекс целенаправленных растениеводческих мероприятий». Культурфитоценоз (от лат. cultura — «возделывание, воспитание» и от греч. φυτόν — «растение» и κοινός — «общий») — сообщество культивируемых растений, обладающее многими особенностями естественного фитоценоза, но формируемое в результате деятельности человека [Создание..., 2019].

<sup>2</sup> Микоризу образуют как высшие, так и низшие грибы, причем и те, и другие способны выделять белок гломаллин, который непосредственно влияет на плодородность почв.



Рис. 1. Особенности фитоценоза на золоотвале Верхнетагильской ГРЭС [Создание..., 2019]

1. Особенностью ценопопуляции орхидных растений на золоотвале Верхнетагильской ГРЭС является групповое контагиозное размещение по территории особей *Platanthera hifolia* и *Listera ovata*, которые относятся к редким и исчезающим видам Свердловской области. Показано, что освоение техногенных субстратов орхидными связано, в первую очередь, с формированием на них лесных фитоценозов с преобладанием мелколиственных древесных пород. По мере накопления листового опада создаются благоприятные условия развития как для грибов-симбионтов, с которыми орхидные связаны большую часть своей жизни, так и самих орхидных растений, имеющих низкую способность к конкуренции с другими растениями, особенно с крупнотравьем [Чибрик и др., 2011].

2. При культивировании биотических компонентов новых ЭГС, формирующихся в районе распространения намывных массивов, актуально изучение опыта успешного восстановления староосвоенных намывных территорий на базе комплексного использования эндемичных региональных видов в сочетании с агротехническими работами по постпромышленному формированию устойчивого фитоценоза центрального звена биотического компонента ЭГС одного из древнейших горнопромышленных регионов — Урала. Он имеет широкий спектр энергетических и горнопромышленных предприятий, сопутствующим технологическим элементом которых являются намывные гидрозолоотвалы с низким потенциалом самовосстановления. Например, это районы Среднеуральской ГРЭС (таежная зона, подзона южной тайги), Верхнетагильской ГРЭС (таежная зона, подзона южной тайги), золоотвала Южноуральской ГРЭС (лесостепная зона), Шуралино-Ягодного россыпного месторождения золота (таежная зона, подзона южной тайги). Учитывая специфику состава литотопа экогеосистем на намывных грунтах, которым свойственны недостаток доступных растениям элементов минеральной питания (особенно N и P), неблагоприятный водный и воздушный режим микориза, важным является опыт использования системы «культурофитоценоза» [Чибрик, 2002, 2005; Чибрик и др., 2011].

В качестве примера рассмотрим ЭГС массива намывных грунтов Верхнетагильской ГРЭС. Этот мас-

сив сформирован продуктами сжигания углей Челябинского бурогоугольного бассейна. Его ЭГС имеет свою особенность: формирование фитоценозов обусловлено биологической рекультивацией на части золоотвала, проведенной через три года (1968–1970) после прекращения подачи пульпы для снижения водной и ветровой эрозии с поверхности литотопа и развития растительного покрова санитарно-гигиенического назначения с частичным хозяйственным использованием<sup>1</sup> [Чибрик и др., 2011]. В результате работ образовался разнообразный спектр экотопов, включающий участки нерекультивированной территории на «чистой» золе с разной степенью увлажнения, первично рекультивированную территорию с полосным нанесением грунта и вторично рекультивированную территорию со сплошным нанесением торфа [Экологические..., 2002].

На рекультивированной части золоотвала развит фитоценоз с площадью проективного покрытия до 90–100% (рис. 1). Преобладающими в травостое восстановленных сообществ являются злаки (в 2010 г. до 87,63%). При этом биометрические показатели генеративных побегов изменяются в сторону увеличения, кроме количества веточек и колосков в соцветии (табл. 3). Аналогичные данные получены и для вегетативных побегов.

Травянистая растительность на нерекультивированной территории золоотвала более низкорослая с малой плотностью проективного покрытия. По мере приближения к дамбам золоотвала она обедняется по видовому составу.

Таким образом, особенности развития фитоценозов на эдафотопе золоотвала ГРЭС показали, что рекультивационные мероприятия способствовали созданию устойчивых и продуктивных фитоценозов с доминированием *Bromopsis inermis*. Вид *Bromopsis inermis* является перспективным при создании хозяйственно ценных растительных сообществ.

В настоящее время биотический компонент намывных массивов техногенных ЭГС Урала представлен 444 видами флоры: 260 в таежной, 264 в лесостепной и 214 на техногенных объектах степной зоны. Сквозными для всех зон оказались 92 вида. В целом в биотическом компоненте техногенных ЭГС преобладают среди флоры мезофиты (48,9%) и гемикриптофиты (48%), значительную долю составляют сорно-рудеральные виды (27,3%). В процентном отношении в флористическом составе сообществ техногенных ландшафтов преобладают многолетники, иное фиксировалось лишь на ранних стадиях формирования (по проективному покрытию и массе).

<sup>1</sup> Применялось нанесение слоя глинистого грунта толщиной 10–15 см полосами шириной 6–10 м с таким же по размеру межполосным пространством с ориентацией полос поперек господствующего направления ветров. Большинство полос было засеяно многолетними травами (*Agropyron cristatum*, *Bromopsis inermis*, *Festuca rubra*, *Medicago media* Pers., *Onobrychis arenaria* (Kit.) DC. и др.), часть отвала была оставлена под самозарастание.

Таблица 3

Продуктивность культурфитоценозов на золоотвале Верхнетагильской ГРЭС [Чибрик и др., 2011]

Вариант	Год	Хозяйственные группы						Общая масса, г/м <sup>2</sup>
		Злаки		Бобовые		Разнотравье		
		Масса, г/м <sup>2</sup>	Долевое участие, %	Масса, г/м <sup>2</sup>	Долевое участие, %	Масса, г/м <sup>2</sup>	Долевое участие, %	
I	2004	256,21	97,88	1,10	0,42	4,45	1,70	261,76
	2010	177,00	83,11	3,35	1,57	32,63	15,32	212,97
II	2004	245,40	82,60	32,68	11,00	19,06	6,40	297,14
	2010	255,45	87,63	14,16	4,86	21,91	7,51	291,52

От лесной к степной зоне видно снижение доли лесных и луговых видов и увеличение процента лугово-степных и степных видов. По широтным группам четко прослеживается от степной к лесной зоне увеличение доли бореальных видов (с 28,04 до 58,46%) и снижение степных (с 23,28 до 3,07%) [Чибрик и др., 2011].

**Об экологических функциях массивов намывных грунтов.** Массивы намывных грунтов как литотопы ЭГС выполняют ряд важнейших экологических функций, которые имеют специфические черты, рассматриваемые ниже.

*Ресурсная экологическая функция массивов намывных грунтов* (как концентратов ценных вторичных ресурсов) формируется поэтапно на всех звеньях технологической цепочки: от добычи твердых углеводородов, их термохимических превращений в котлах электростанций, гидротранспортировки по трубопроводам в составе пульпы (соотношение твердой (золошлаковой) и жидкой (водной) фазы 1:(50–70), реже 1:20), в процессе гидронамыва и техногенного седиментогенеза в теле массива.

Например, на электростанции, сжигающей 1 млн т угля со средней зольностью 20%, ежегодно скапливается около 190 тыс. т золы и шлака. В целом по стране золошлаковые отходы энергетики оцениваются не менее чем в 100 млн т в год. Около 1 млрд т шлака и золы уже находятся в отстойниках и отвалах. Они обогащены по сравнению с литосферой отдельными элементами.

Зола от сжигания твердого топлива преимущественно состоит (на 98–99%) из свободных и связанных соединений оксидов кремния, алюминия, железа, кальция, магния, калия, натрия, титана, серы. По химическому составу золы классифицируются на высококальциевые (концентрация СаО более 20%) и кислые (СаО менее 20%). Исходя из особенностей макросостава, золошлаковый материал (ЗШМ) — потенциальный ресурс для производства цемента, кирпича, ячеистого бетона, легких заполнителей, оснований автодорог и других сфер хозяйственной деятельности. Благодаря искусственному минералообразованию идет связывание подвижных элементов в новые минеральные ассоциации, в результате чего токсичные элементы исключаются из миграционных процессов.

Как было отмечено ранее, эколого-ресурсной особенностью *намывных массивов* является вертикальная и горизонтальная дифференциация материала по гранулометрическому составу. Плотность колеблется в интервале 1,53–2,60 г/см<sup>3</sup>, коэффициенты фильтрации для шлаковой зоны достигают 9–10 м/сут и выше [Ларионова, 2017; Огородникова, Николаева, 2017; Намывные..., 2014; Varaboshkina et al., 1988].

Гидрозолоотвалы и шламонакопители являются ресурсом химически активных веществ, которые определяют состав техногенных водоносных горизонтов, формирующихся в абиотических компонентах ЭГС. Несмотря на организацию специальных дренажных мероприятий (дренажных колодцев, водосборных канав по внешнему периметру золошлакоотвала и прудов с осветленной водой), воды техногенного водоносного горизонта попадают в поверхностные и грунтовые воды, изменяя их состав. ЭГС районов развития намывных техногенных массивов обуславливают трансформацию эколого-геологических условий районов под влиянием геодинамических, геохимических и геофизических факторов, интенсивность которых предопределяет вектор и скорость техногенных, инфильтрационных и седиментологических процессов.

Комплексный эколого-геологический анализ и картографирование ЭГС территорий ряда станций, имеющих комбинированную выработку электрической и тепловой энергии, осуществлен Барабошкиной Т.А. (Varaboshkina, 2002) на базе синхронизации данных о состоянии абиотических (намывные техногенные грунты, подземные воды, донные отложения, почвы) и биотических (фитоценозы, бентосные организмы, здоровье населения) компонентов ЭГС; выполнено районирование их территории на классы состояния эколого-геологических условий по уровню изменения абиотической и биотической составляющей эколого-геологических систем.

Важной особенностью ресурсного потенциала ЭГС массивов намывных грунтов является обогащение золошлакового материала широким спектром элементов, важных для современной индустрии. Актуально выполнять их предварительную оценку с позиции техногенного месторождения в целях по-

иска редких и рассеянных элементов, дефицитных для различных сфер экономики.

При низких концентрациях в намывных ЭГС ресурсов стратегически важных химических элементов целесообразно совершенствование методик использования ЗШМ в строительной индустрии в составе композиционных материалов для удешевления стоимости объектов экономики и связывания токсичных элементов в малоподвижные комплексы.

*Геодинамическая экологическая функция массивов намывных грунтов* предопределена совокупностью состава и свойств накопленных материалов, поэтому, зачастую при отсутствии в староосвоенных промышленных районах эффективных противофильтрационных мероприятий, имеет тесную гидравлическую связь техногенных массивов с подземной и поверхностной гидросферой и влияет на формирование качества водных ресурсов прилегающих селитебных районов.

Вместе с тем в промышленно перегруженных районах нами наблюдалась ситуация, когда вода в обводной канаве вокруг гидроотвала по концентрации ряда тяжелых металлов имела более низкую концентрацию, чем в р. Иртыш, и служила местом экспериментального разведения ихтиофауны. Исключением являлся стронций, имевший превышение над фоновыми концентрациями, что, вероятно, явилось одним из факторов утончения раковин у пресноводных обитателей искусственного водоема [Baraboshkina, 2002]. Однако данные исследования необходимо расширить и доизучить на аналогичных объектах.

За счет техногенных геодинамических факторов имеет место дифференциация в потоке по грансоставу намываемых материалов. Например, в зоне выпуска пульпы преобладающей является фракция песка, в промежуточной зоне — фракция крупной пыли, а в центральной зоне преобладают фракции крупной и мелкой пыли. По мере движения гидравлического потока осаждаются все более легкие частицы вплоть до уреза воды пруда осветления<sup>1</sup>, куда стекают в основном глинистые и коллоидные фракции намываемого материала [Огородникова и др., 2013]. В зависимости от уровня обводненности территории и формируются определенные фитоценозы [Миرونчева, Токарева, 1998; Мокронос, 1966], которые были охарактеризованы в предыдущих разделах.

Эпизоды обострения качества ресурсного потенциала среды для населения и персонала в районе массивов техногенных грунтов фиксируются при снижении пылеподавляющих мероприятий, что ведет к увеличению интенсивного пылевого сноса мелкодисперсной фракции с открытых пляжевых

зон на прилегающую территорию [Воронкевич, 2015; Ларионова, 2017; Сорокина и др., 2011].

Сопоставление статистических данных по заболеваемости жителей сел, расположенных вблизи намывных массивов, в сравнении с проживающими в селах, находящимися на условно фоновых территориях, показало, что в ряде случаев фиксируются более высокие показатели бронхо-легочной патологии у всех возрастных и гендерных групп [Сысоев и др., 1997; Baraboshkina, 2002].

*Геохимическая и геофизическая экологические функции массивов намывных грунтов* заключаются в прямой зависимости ведущей ассоциации элементов, в том числе радионуклидов, от типа используемых углей, технологии сжигания и способа удаления продуктов сгорания, местоположения и состава осадка.

Среди *микрокомпонентов* наиболее часто фиксируется в золах бор, молибден, стронций, цирконий, уран, мышьяк, ванадий, цинк, свинец, никель, кобальт, скандий [Воронкевич, 2015; Николаева и др., 2012]. С увеличением щелочности миграционная способность элементов катионов снижается, а микроэлементов, входящих в состав анионов Mo, V, As, Se возрастает, что может приводить к формированию в пределах ЭГС намывных грунтов и биогеохимических аномалий, характеризующихся повышенным содержанием в природных средах спектра токсичных элементов, способных вызывать негативные изменения в развитии растений, животных и человека [Алексеев и др., 2013; Трофимов и др., 2006].

Исследования аквальных экосистем (техногенные озера, пруды), приуроченных к золоотвалам одной из ТЭЦ в г. Омске, показали, что наряду с изменением состава подземных и поверхностных вод, донных отложений, идет изменение макро- и микроэлементного состава бентосных организмов. В раковинах моллюсков нарушается соотношение Ca и Sr в пользу последнего элемента, раковины становятся хрупкими и прозрачными, что ведет к преждевременной гибели моллюсков [Baraboshkina, 2002].

Одним из *способов снижения миграционной способности токсичных элементов* является формирование на основе зол и шлаков новых дорожно-строительных материалов, методика которых много десятилетий разрабатывается в лаборатории технической мелиорации МГУ имени М.В. Ломоносова и в других организациях РФ [Воронкевич, 2015; Ларионова, 2017; Огородникова, Николаева, 2017; Барабошкина, Огородникова, 2014; Намывные..., 2014 и др.].

**Выводы.** Интенсивность динамики ресурсного потенциала массивов грунтов намывных ЭГС энергетических объектов зависит от совокупности технологических и природных факторов. К первой группе «технологических факторов» можно отнести: вид сжигаемого топлива, уровень внедрения на

<sup>1</sup> Для снижения количества загрязненной воды, сбрасываемой в гидросферу из систем гидрозолоудаления, осуществляется их перевод на оборотный цикл: осветленная на золоотвале вода из прудов осветления возвращается в котельную (на электростанцию) для повторного использования.

предприятиях наилучших доступных технологий, мощность теплоэлектростанции и др. Вторую группу составляют «природные факторы» — главные ее компоненты, как правило, метеорологические, геолого-геоморфологические и ландшафтно-геохимические характеристики территории.

Одним из путей снижения карбонового следа является перевод угольных и торфяных энергообъектов на газовое топливо, особенно в районах, где «хаотичная урбанизация» ориентировалась на минимизацию расстояний от промышленных источников тепла и энергии до селитебных территорий. Данный тренд привел к «внедрению» селитебных районов в пределы санитарно-защитных зон сооружений электростанций. Это осложнило как процесс эксплуатации гидротехнических сооружений, так и существенно снизило качество ресурса геологи-

ческого пространства территории для проживания населения и некоторых видов хозяйственной деятельности.

Практически все экологические функции литосферы испытывают изменения в зоне воздействия намывных ЭГС при низком уровне внедрения биологической рекультивации и других методов реабилитации эколого-геологических условий намывных территорий.

Рационально проводить комплексное доизучение потенциала намывных ЭГС на предмет разработки мероприятий по коррекции эколого-геологических условий района на основе анализа положительного опыта российских ведущих научных школ в сфере внедрения зеленых технологий, с учетом зональных особенностей техногенно-освоенных территорий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абакумова Н.В., Николаева С.К., Самарин Е.Н.* Классификации техногенных отложений в инженерной геологии: исторический обзор, современный взгляд на проблему // Инженерные изыскания. 2021. Т. 15, № 1–2. С. 28–40.
- Алексеев В.А., Бузмаков С.А., Панин М.С.* Геохимия окружающей среды. Пермь: ПГНИУ, 2013. 359 с.
- Анализ ситуации с горнопромышленными отходами. Геоэкологический аспект / Мосейкин В.В., Гальперин А.М., Ермолов В.А., Круподеров В.С. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). № 1. М.: Горная книга, 2013. 648 с.
- Барбошкина Т.А., Огородникова Е.Н.* Эколого-экономический потенциал вторичных ресурсов Северной Евразии // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ). 2014. Т. 19, № 1. С. 41–45.
- Виноградов А.П.* Геохимия живого вещества. Л., 1932. 67 с.
- Воронкевич С.Д.* Техническая мелиорация грунтов. М.: Академическая наука, 2015. 242 с.
- Гальперин А.М., Кутепов Ю.И., Кириченко Ю.В.* и др. Освоение техногенных массивов на горных предприятиях. М.: Горная книга, 2012. 336 с.
- Гальперин А.М., Фёрстер В., Шеф Х.-Ю.* Техногенные массивы и охрана природных ресурсов. Т. 1. Намывные насыпные массивы. М.: Изд-во Московского горного университета, 2006. 391 с.
- ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. Межгосударственный стандарт. Издание официальное. М.: Стандартинформ, 2020 (введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 января 2021 г.). 38 с.
- Дайбо М.И.* Среднеуральская ордена Ленина ГРЭС. Свердловск, 1969. С. 5–28.
- Королёв В.А., Трофимов В.Т.* К построению общей классификации континентальных эколого-геологических систем // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 1. С. 62–66.
- Ларионова Н.А.* Использование промышленных отходов в качестве вторичного минерального сырья для получения строительных материалов с заданными свойствами / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: ГеоИнфо, 2017. 498 с.
- Логинова В.Г., Ивашкина Л.А.* Микориза ивы // Микориза и другие формы консортивных связей в природе. Пермь: ПГПИ, 1985. С. 30–32.
- Лукина Н.В.* Мониторинговые исследования на золоотвале Верхнетагильской ГРЭС // Система управления экологической безопасностью: Сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. С. 343–347.
- Лукина Н.В., Глазырина М.А., Филимонова Е.И.* и др. Комплексные исследования формирования лесных фитоценозов на золоотвале Верхнетагильской ГРЭС // Экологические системы: фундаментальные и прикладные исследования: сб. материалов II Всерос. науч.-практ. конф. (Нижний Тагил, 24–28 марта 2008 г.). Нижний Тагил: НТ гос. соц.-пед. акад., 2008. Ч. 2. С. 35–40.
- Миронычева-Токарева Н.Г.* Динамика растительности при зарастании отвалов. Новосибирск: Наука, 1998. 169 с.
- Мокроносов А.Т.* Использование продуктов фотосинтеза в ростовых процессах // Фотосинтезирующие системы высокой продуктивности. М.: Наука, 1966. С. 157–162.
- Намывные грунты и управление их свойствами / Е.Н. Огородникова, С.К. Николаева, В. Чин и др. М.: РУДН, 2014. 368 с.
- Немировский А.В.* Проблемы осадения пыли при функционировании хвостохранилища Стойленского ГОКа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 5. С. 387–391.
- Николаева С.К., Огородникова Е.Н., Андреева Т.В.* Массивы намывных грунтов — источник техногенных опасностей // Геоэкология. 2012. № 3. С. 256–262.
- Огородникова Е.Н., Барбошкина Т.А., Мымрин В.А.* Вторичные ресурсы для дорожной индустрии — золы теплоэлектростанций и шлаки черной металлургии. М.: РУДН, 2013. 243 с.
- Огородникова Е.Н., Николаева С.К.* Техногенные грунты. М.: РУДН, 2017. 636 с.
- Огородникова Е.Н., Николаева С.К., Барбошкина Т.А.* Особенности минерального состава золошлакоотвалов — продуктов техногенеза // Вестн. РУДН. Сер. «Экология и безопасность жизнедеятельности». 2011. № 3. С. 20–25.
- Панин П.С., Ковалев Р.В.* Химические и водно-физические свойства золоотвалов Новосибирской ТЭЦ // Рекультивация в Сибири и на Урале. Новосибирск: Наука, 1970. С. 99–116.

Пасынкова М.В. Зола углей как субстрат для выращивания растений // Растения и промышленная среда: Сб. науч. тр. Свердловск: УрГУ, 1974. С. 29–44.

Пикалова Г.М. Перспективные культуры для выращивания на золоотвале // Растительность и промышленные загрязнения: охрана природы на Урале. Свердловск: РИСО УФАН СССР, 1966. Вып. 5. С. 129–132.

Селиванов И.А. Микосимбиотрофизм как форма консортивных связей в растительном покрове Советского Союза. М.: Наука, 1981. 232 с.

Серая Г.Т., Шубин Ф.М. Особенности роста и развития пионерных растений при выращивании их на каменноугольной золе // Растения и промышленная среда: Сб. науч. тр. Свердловск: УрГУ, 1976. С. 56–62.

Создание и изучение культурфитоценозов на нарушенных промышленностью землях: Учеб. пособие / Т.С. Чибрик, М.А. Глазырина, Е.И. Филимонова, Н.В. Лукина / Науч. ред. Т.А. Радченко. М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 146 с.

Сорокина О.И., Кошелева Н.Е., Голованов Д.Л. Особенности загрязнения снежного покрова под воздействием топливно-энергетического комплекса (г. Улан-Батор) // Экологические проблемы промышленных городов. Т. 1. Саратов, 2011. С. 141–144.

Сысоев Ю.М., Барабошкина Т.А. Некоторые аспекты воздействия золоотвалов ТЭС на окружающую среду // Энергетик. 1997. № 6. С. 6–8.

Трофимов В.Т. Эколого-геологическая система, ее типы и положение в структуре экосистемы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2009. № 2. С. 48–52.

Трофимов В.Т. Эколого-геологическая система и новая структура экосистемы // Геология, география и глобальная энергия. 2010. № 1(36). С. 6–26.

Трофимов В.Т., Барабошкина Т.А., Жигалин А.Д., Харьковина М.А. Изменение экологических функций литосферы под влиянием энергетических комплексов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2006. № 1. С. 49–58.

Целюк Д.И. Особенности техногенного воздействия золоотвалов Средней Сибири на подземные воды: Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ВИМС, 2009. 23 с.

Чибрик Т.С. Исследования по проблеме биологической рекультивации нарушенных земель в Уральском университете: к 100-летию со дня рождения В.В. Тарчевского // Изв. Урал. гос. ун-та. 2005. № 37: Проблемы образования, науки и культуры. Вып. 18. С. 92–100.

Чибрик Т.С. Основы биологической рекультивации. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2002. 172 с.

Чибрик Т.С. Экологические основы и опыт биологической рекультивации нарушенных промышленностью земель / Т.С. Чибрик, Н.В. Лукина, Е.И. Филимонова, М.А. Глазырина. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2011. 268 с.

Шкараба Е.М. Развитие микоризы в ходе онтогенеза кислицы обыкновенной (*Oxalis acetosella* L.) // Микориза и другие формы консортивных связей в природе: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь: ПГПИ, 1983. С. 24–28.

Экологические основы и методы биологической рекультивации золоотвалов тепловых электростанций на Урале / А.К. Махнев, Т.С. Чибрик, М.Р. Трубина и др. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 356 с.

Экологические функции литосферы / В.Т. Трофимов, Д.Г. Зилинг, Т.А. Барабошкина и др. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 432 с.

Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях. Екатеринбург: УРО РАН, 2005. 648 с.

Baraboshkina T.A. An estimation of environmental effect of ash stockpiles of Omsk Coal Combustion-Station // 7<sup>th</sup> International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production. SWEMP 2002 / Cagliari, Italy, 2002. P. 1–12.

Baraboshkina T.A., Ogorodnikova Y.N., Astakhov M.I. The composition and properties of certain types of technogenic soils and the possibility of using them in civil engineering // Moscow University Geol. Bull.. 1988. No. 5. P. 48–53.

Holliday R., Townsend W., Hodson D. Plant growth on «fly ash» // Nature. 1955. No. 4490. P. 48.

Статья поступила в редакцию 20.04.2024,  
одобрена после рецензирования 03.06.2024,  
принята к публикации 25.10.2024