УДК: 504.54 **DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-201-211**

Н.Г. Максимович[1], **О.А. Березина**[2], **О.Ю. Мещерякова**[3], **А.Д. Деменев**[4]

ИЗУЧЕНИЕ МИГРАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

АННОТАЦИЯ

Изучение закономерностей формирования и миграции техногенных донных отложений в речных экосистемах горнопромышленных районов является актуальным направлением работ отечественных и зарубежных исследователей в связи с высокой потребностью снижения техногенной нагрузки на природные компоненты окружающей среды. В представленном исследовании рассматриваются проблемы миграции загрязняющих веществ и формирования техногенных донных отложениях в речных экосистемах в районе Кизеловского угольного бассейна (Пермский край, Россия). Масштаб проблемы определяется существованием многочисленных источников, содержащих экстремально высокие концентрации элементов 1-го, 2-го и 3-го классов опасности.

Основными источниками поступления загрязняющих веществ на исследуемой территории являются кислые шахтные воды, разгружающиеся через бывшие горные выработки и родники, а также стоки с породных отвалов. Эти техногенные растворы характеризуются многокомпонентным составом, в которых отмечаются высокие концентрации следующих элементов: Fe, Al, Mn, Zn, Be, Cu, Pb, Cd и др. Превышение ПДК по некоторым элементам достигает сотни и тысячи раз; всего на территории бывшего Кизеловского угольного бассейна и в зоне его влияния, по разным оценкам, загрязнено более 500 км рек.

В статье приведена характеристика донных отложений р. Косьвы, одной из крупнейших региональных рек, по данным многолетних наблюдений 1984–2018 гг., натурных исследований, а также при применении ГИС-технологий и созданной геоэкологической геоинформационной системы Кизеловского угольного бассейна. Также на основе мирового опыта предложены природоохранные мероприятия для восстановления речных экосистем территории.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: промышленные регионы, гидросфера, донные отложения, тяжёлые металлы, шахтные воды

[1] ФГБОУВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, д. 15, 614990, Пермь, Россия; *e-mail:* **nmax54@gmail.com**
[2] ФГБОУВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, д. 15, 614990, Пермь, Россия; *e-mail:* **berezina.olga16@gmail.com**
[3] ФГБОУВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, д. 15, 614990, Пермь, Россия; *e-mail:* **olgam.psu@gmail.com**
[4] ФГБОУВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, д. 15, 614990, Пермь, Россия; *e-mail:* **demenevartem@gmail.com**

Nikolay G. Maksimovich[1], **Olga A. Berezina**[2], **Olga Yu. Meshcheriakova**[3], **Artem D. Demenev**[4]

RESEARCH OF MIGRATION OF TECHNOGENIC BOTTOM SEDIMENTS WITH APPLICATION OF MODERN GEOINFORMATION SYSTEMS

ABSTRACT

The study of the regularities of formation and migration of technogenic bottom sediments in river ecosystems of mining regions is an urgent area of works of domestic and foreign researchers in connection with the high need to reduce the anthropogenic impact on the natural components of the environment. This article is devoted to the problems of the migration of pollutants and the formation of technogenic bottom sediments in river ecosystems in the Kizel coal basin (Perm Region, Russia). The scale of the problem is determined by the existence of numerous sources containing extremely high concentrations of elements of the 1st, 2nd and 3rd hazard classes.

The main sources of contaminants on the study area are acid mine waters discharged through former mines and springs, as well as effluents from waste dumps. These technogenic solutions are characterized by a multicomponent composition, in which high concentrations of the following elements (Fe, Al, Mn, Zn, Be, Cu, Pb, Cd et al.) are noted. Exceeding the MPC for some elements reaches hundreds and thousands of times; in all, according to various estimates, over 500 km of rivers are polluted in the territory of the former Kizel coal basin and in the zone of its influence.

The article describes the characteristics of bottom sediments of the river Kos'va, one of the largest regional rivers, according to long-term observations from 1984−2018, field studies, as well as the use of GIS technologies and the created geo-ecological geoinformation system of the Kizel coal basin. Also, based on international experience, environmental measures were proposed to restore the river ecosystems of the territory.

KEYWORDS: industrial regions, hydrosphere, bottom sediments, heavy metals, mine water

ВВЕДЕНИЕ

Проблема миграции химических элементов в горнопромышленных районах стала предметом широких исследований в последней четверти прошлого века [*Blair et al.*, 1980; *Borman*, *Watson*, 1976; *Smith*, 1980]. Основными направлениями работ являются: оценка экологической опасности, которую представляют отходы производства, в т.ч. выносимые кислым дренажным потоком тяжёлые металлы; анализ механизмов миграции отходов и создаваемых ими экологических рисков; разработка методик очистки природной среды и элементов инфраструктуры от токсичных загрязнений [*Опекунов, Опекунова,* 2005; *Bortnikova et al.*, 2006; *Loop et al.*, 2003; *Ramstedt et al.*, 2003; *Uhlmann et al.*, 2004].

Изучение эпигенетических процессов в зоне гипергенеза [*Перельман,* 1972] привело к уточнению представлений об осадконакоплении и формированию понятия геохимических барьеров, обусловливающих наиболее интенсивное накопление различных химических элементов и в целом существенно влияющих на их пространственно-временное распределение.

Техногенез вызывает перестройку природных экосистем, приводя к появлению нетипичных для естественных условий новообразований, характеризуемых осаждением взвешенного вещества и химическими преобразованиями растворенных компонентов,

[1] Perm State University, Bukirev str., 15, 614990, Perm, Russia; *e-mail:* **nmax54@gmail.com**
[2] Perm State University, Bukirev str., 15, 614990, Perm, Russia; *e-mail:* **berezina.olga16@gmail.com**
[3] Perm State University, Bukirev str., 15, 614990, Perm, Russia; *e-mail:* **olgam.psu@gmail.com**
[4] Perm State University, Bukirev str., 15, 614990, Perm, Russia; *e-mail:* **demenevartem@gmail.com**

формирующих современные донные осадки. Так, например, изливы высокоминерализованных шахтных вод, возникающие на территории ликвидированных шахт Кизеловского угольного бассейна (КУБ) (восток Пермского края), существенно повышают долю техногенных донных отложений в водных объектах региона.

Активно накапливаются в донных отложениях тяжёлые металлы (ТМ). Этот процесс резко интенсифицировался в последние годы. В свою очередь, техногенные отложения такого рода могут вызвать вторичное интенсивное загрязнение, сыграв роль эффективного накопителя в определённых гидрологических и гидрохимических условиях.

Крайне актуально исследование процессов формирования и распространения вторичного загрязнения ТМ в промышленных регионах, характеризуемых поступлением в водные объекты больших объёмов недостаточно очищенных шахтных вод [*Тарасенко,* 2018; *Янин*, 2013].

Детальное изучение закономерностей распространения и накопления ТМ, сорбирующихся на микрочастицах в донных отложениях, и условий, способствующих формированию вторичного загрязнения водных экосистем, требует применения современных геоинформационных технологий. Следует отметить значительную важность исследования устьевых зон, где накопление донных отложений идёт ускоренными темпами в связи с изменениями гидродинамических характеристик. Гидрологическая сеть Пермского края, включающая крупные реки, притоки Камского водохранилища, формирующие крупные заливы, является одним из характерных примеров высокого содержания ТМ среди загрязнителей донных отложений.

Таким образом, исследование функционирования и преобразования техногенно загрязнённых водных экосистем в условиях антропогенного стресса, базирующееся на современных геоинформационных технологиях, представляет чрезвычайно актуальную научную и практическую задачу.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Характеристика состояния донных отложений р. Косьвы и источников их загрязнения составлена по результатам работ лаборатории геологии техногенных процессов Естественнонаучного института Пермского университета с 1984 по 2018 гг., по данным мониторинга, проводившегося «Уральским центром социально-экологического мониторинга углепромышленных территорий» в 2017–2018 гг. Также использованы фондовые и опубликованные материалы результатов исследований ООО «МНИИЭКО ТЭК» и др. организаций. При обработке и анализе информации использовались возможности современных геоинформационных технологий и результаты обработки данных ДЗЗ.

При анализе состояния донных отложений использованы фоновые значения, т.к. нормативов для оценки их экологического состояния не существует. Образцы были отобраны в аналогичных природных условиях и минимальном техногенном воздействии. При анализе химического состава донных отложений также учтены общие параметры, характерные для рек Пермского края: гидрокарбонатно-кальциевая фация, содержание солей менее 1 000 мг/кг и нормальная кислотность.

С учётом имеющихся данных, а также аппаратных и программных средств в рамках научного проекта № 17-05-41114 «Применение ГИС-технологий для оценки и прогноза экологической ситуации в угледобывающих районах с критической техногенной нагрузкой» при финансовой поддержке РФФИ и РГО, была создана геоэкологическая ГИС Кизеловского угольного бассейна и разработаны её функциональные возможности, позволяющие рассматривать данную веб-ГИС как один из инструментов организации экологического мониторинга исследуемой территории. Интерфейс доступа к ГИС организован в виде картографического веб-сервиса, расположенного в сети Интернет по адресу http://kub.maps.psu.ru. Более подробно с функциональными возможностями веб-

ГИС можно ознакомиться в статье [*Пьянков и др.,* 2019]. Слои источников загрязнения содержат информацию о более чем 130 отвалах, 19 изливах кислых шахтных вод и 11 загрязнённых родниках, существует информация о химическом составе донных отложений в разных точках пространства. Также для отвалов по космическим снимкам сверхвысокого разрешения подложки ESRI ArcGIS World Imagery создан полигональный векторный слой их контуров, а по ЦМР определено направление кислых стоков с них до ближайшего водотока, что позволило провести анализ изменения химического состава донных отложений р. Косьвы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее опасный в экологическом отношении для рек КУБа является осадок, образующийся химическим путем при повышении pH в результате смешения шахтных и речных вод. На загрязнённых участках рек ежесуточно образуются десятки тонн техногенных донных осадков, представленных в основном аморфными гидроксидами железа и алюминия с высоким содержанием марганца, меди, никеля, цинка, свинца и др. Он представляет собой взвесь, способную мигрировать вниз по течению рек на многие километры и оказывать негативное влияние на окружающую среду и качество водозаборов поверхностных вод. Этот осадок является источником вторичного загрязнения воды, т.к. содержит значительное количество подвижных форм микроэлементов, таких как марганец, алюминий, цинк, никель, кобальт и т.д. Частичная аккумуляция осадка происходит на всём протяжении сброса в береговой зоне и на участках с низкими скоростями течения воды. Однако в паводковый период происходит интенсивный смыв осадка. Зоной аккумуляции осадка являются приустьевые участки рек и прилегающая часть Камского водохранилища, наиболее крупный Косьвинский залив.

Косьва является левым притоком реки Камы. Длина реки — 283 км, площадь бассейна составляет 6 300 км^2. Исток и верхнее течение находится на западе Свердловской области. В верховьях течение имеет горный характер. Река Косьва, многоводная и быстрая весной, летом сильно мелеет. В Пермском крае река течёт по территории Александровского, Кизеловского, Губахинского и Добрянского районов. В посёлке Широковский на р. Косьве расположена плотина Широковской ГЭС и Широковское водохранилище площадью 41 км^2.

Бассейн р. Косьвы характеризуется интенсивным развитием карстовых процессов, которые определяют особенности стока поверхностных вод. Поверхностные формы карста представлены воронками, котловинами, карстовыми логами. Встречаются также пещеры и подземные реки. В естественных условиях поверхностный сток частично или полностью поглощается карстовыми воронками, образуя суходолы на значительных участках долины. Следуя по карстовым полостям, воды разгружаются в виде источников в долине реки.

Источниками поступления загрязняющих компонентов являются изливы шахт им. 1-го Мая, им. Крупской и объединённый излив шахт им. Калинина, им. Урицкого и Центральной (выход шахтных вод осуществляется через штольню шахты им. Калинина). Изливающиеся на поверхность шахтные воды имеют кислую реакцию среды и сульфатный состав. Воды характеризуются чрезвычайно высокими концентрациями железа, алюминия, берилла и марганца; их содержание в воде превышает ПДКхп зачастую более чем в 1 000 раз. Помимо изливов, непосредственными источниками загрязнения р. Косьвы являются притоки, загрязнённые воды которых, поступая в р. Косьву, дополнительно ухудшают её экологическое состояние. Общая длина загрязнённых от изливов водотоков составляет 130 км.

Постоянным источником загрязнения также являются породные отвалы. Таким источником загрязнения является породный отвал шахты им. Крупской, расположенный на берегу р. Косьвы. Несмотря на сравнительно небольшие объёмы стоков с породных

отвалов, их состав характеризуются очень высоким содержанием загрязняющих веществ (Fe, Al, Be и Mn) и крайне кислой реакцией среды.

В естественных условиях воды р. Косьвы и её притоков имеют гидрокарбонатно-кальциевый состав, реакцию среды, близкую к нейтральной, и минерализацию до 120 г/л Оценка качества поверхностных водотоков бассейна р. Косьвы показывает, что на участке интенсивного техногенного влияния воды р. Косьвы характеризуются кислой реакцией и стабильно высоким содержанием железа (4,9–36,3 мг/дм^3, что соответствует 49–363 ПДК$_{рх}$), повышенным содержанием алюминия, бериллия, марганца, а иногда и др. микроэлементов.

За счёт боковой приточности чистых вод и самоочищающей способности реки, в устьевой части р. Косьвы прослеживается улучшение качества вод: содержание солей (сухой остаток) изменяется в пределах 64–390 мг/дм^3; кислотность речных вод либо соответствует нормальной, либо слабокислой (pH 6,2–7,9); концентрации железа уменьшаются, оставаясь выше допустимого уровня (0,5–3,2 мг/дм^3 или 532 ПДК$_{рх}$) [*Максимович, Пьянков,* 2018].

Основные источники поступления высокоминерализованных кислых шахтных вод и, как следствие, образование техногенных донных отложений на водосборе р. Косьвы представлены на рис. 1.

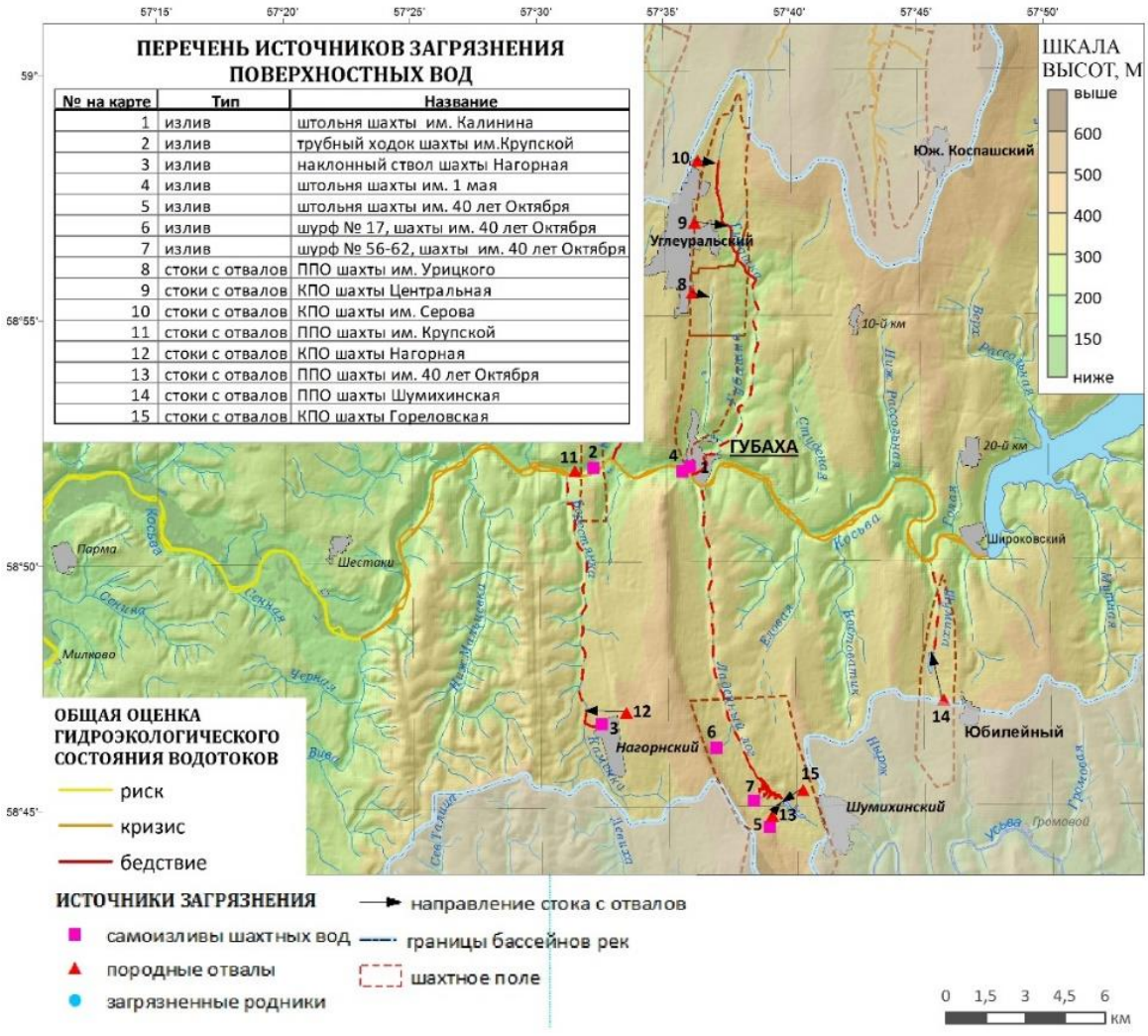

Рис. 1. Источники загрязнения поверхностных вод бассейна р. Косьвы
Fig. 1. Sources of surface water pollution in the basin of the Kos'va river

Основным источником загрязнения территории Кизеловского угольного бассейна являются кислые шахтные воды, разгрузка которых в основном происходит через бывшие горные выработки и родники. Кислые шахтные воды формируют более 90 % поступления загрязняющих веществ в окружающую среду, включая поверхностные воды и, следовательно, донные отложения. На территории исследований отмечено 19 изливов и 12 родников, где фиксируется разгрузка кислых вод. Средний объём разгрузки в последние годы составлял 25–30 млн м^3/год, содержание железа превышает ПДК до 16 000 р., алюминия — до 1 000 р., марганца — до 2 000 р., общая минерализация превышает ПДК до 2 200 р., показатель pH вод изменяется в пределах 2,3–4,5. Также значительный вклад (около 10 %) в формирование загрязнения поверхностных вод и донных отложений территории Кизеловского угольного бассейна вносят кислые стоки с породных отвалов. Всего выделено более 70 отвалов общим объёмом свыше 35 млн м^3, показатель pH формирующихся стоков с этих отвалов изменяется в пределах 2,3–3,7. При этом в результате угледобычи площадь нарушенных земель, требующих рекультивации, составляет не менее 500 га.

В фоновой точке наблюдения в составе песчаной фракции донных отложений на фоне доминирующего кварца (69,1 %) и значительного содержания карбонатов (11,4 %), наблюдается присутствие зёрен хлорита (2,0 %), амфиболов (1,8 %), эпидота (1,4 %), хромита (0,9 %), пироксенов (0,9 %), гематита (0,5 %), гидрогетита и лейкоксена (0,2 %). Водную вытяжку характеризуют гидрокарбонатно-кальциевый состав, содержание водорастворимых солей — 0,6 г/кг, pH 7,6. Железа и алюминия не обнаружено, либо их количество незначительно.

Рис. 2. Техногенный осадок в русле р. Косьвы ниже г. Губахи
Fig. 2. Technogenic sediment in the Kos'va river below Gubakha town

Последствия угледобычи прослеживаются по составу донных отложений р. Косьвы на значительном удалении от территории Кизеловского угольного бассейна, что подтверждают результаты опробования реки в с. Перемском. Здесь минеральный состав

донных отложений на 90 % представлен рентгеноаморфными гидроксидами железа оранжевого цвета; загрязнение ими заметно при визуальном наблюдении (рис. 2, 3). Содержание водорастворимых солей составляет 4,6 г/кг, что в 7,6 р. выше фонового. Вытяжка имеет гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевый состав, водородный показатель — нейтральный (7,3). Присутствует значительное количество сульфатов и железа. В донных отложениях увеличено содержание ряда микроэлементов не только по сравнению с фоновой точкой, но и в сравнении со створом, расположенным ниже г. Губахи (табл. 1, 2) [*Максимович, Пьянков,* 2018].

Рис. 3. Техногенный налёт на аллювиальных отложениях р. Косьвы
Fig. 3. Technogenic plaque on alluvial deposits of the Kos'va river

Табл. 1. Содержание микроэлементов в подвижной форме в донных отложениях р. Косьвы [Максимович, Пьянков, 2018]
Table 1. The content of trace elements in mobile form in the bottom sediments of the Kosva river [Maksimovich, Pyankov, 2018]

№ пробы	Место отбора	Содержание компонентов, мг/кг							
		Cd	Co	Li	Mn	Cu	Ni	Pb	Zn
26	100 м выше излива шахты им. 40 лет Октября	0,071	0,049	0,722	29,90	2,338	0,607	<0,050	2,731
29	Около ж/д моста Чусовой-Соликамск	0,109	0,706	0,070	283,62	4,593	5,614	0,808	3,260
48	Село Перемское	0,219	8,030	0,379	274,88	2,714	13,292	<0,050	22,91

Табл. 2. Результаты рентгеноструктурного анализа донных отложений р. Косьвы [Максимович, Пьянков, 2018]
Tab. 2. The results of x-ray analysis of bottom sediments of the Kos'va river [Maksimovich, Pyankov, 2018]

№ пробы	Минеральный состав, %									
	Кварц	Плагиоклаз	КПШ	Кальцит	Иллит + гидросл.	Каолинит	Смектит	Пирит	Гетит	РАВ
26	58	8	3	5	1	1	1	Сл	<1	88
28	20	2	1	–	4	5	3	–	–	65
29	20	4	1	–	3	3	2	–	<1	66
48	10	–	–	–	–	–	–	–	–	30

В составе донных отложений обнаруживаются опасные вещества, в т.ч. первого (чрезвычайно опасные) и второго (высоко опасные) классов опасности, что оказывает крайне негативное воздействие на гидробионты.

В поймах и руслах рек бассейна р. Косьвы накопилось огромное количество техногенных донных отложений, представленных в основном аморфными гидроксидами железа и алюминия, имеющими характерный рыжий цвет, — места их аккумуляции хорошо различимы на космоснимках (рис. 4).

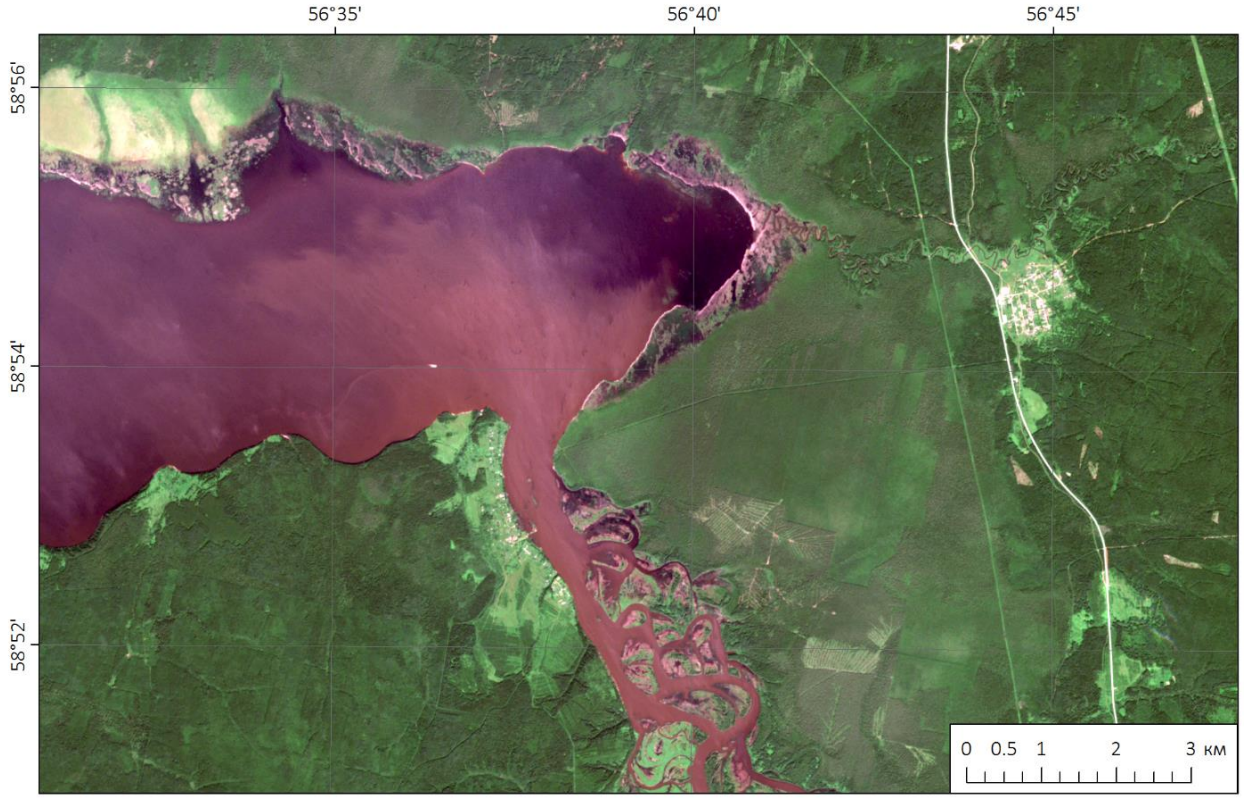

Рис. 4. Загрязнённая техногенными осадками устьевая часть р. Косьвы
Fig. 4. The estuary part of the Kos'va River contaminated by technogenic sediments

Для оценки загрязнения пойм использовались космические снимки со спутников серии LANDSAT за период максимального подъёма уровня воды при прохождении весеннего половодья (был использован снимок за 23.05.1998). Для построения «маски» воды был использован алгоритм неуправляемой классификации снимка IZODATA по ближнему и среднему инфракрасным каналам (в которых водная поверхность успешно отделяется от всех объектов суши). Площадь, занимаемая руслом реки в летний период, оценивалась по топографическим картам м-ба 1:1 000 000. Путём вычитания площади водной поверхности в весенний и летний периоды была определена зона сезонного затопления. Общая площадь территории, подверженной затоплению загрязнёнными водами в бассейне р. Косьвы, составляет 770 га.

ВЫВОДЫ

Таким образом, донные отложения гидрологической сети КУБа состоят в основном из гидроокислов железа и алюминия с высоким содержанием микроэлементов и оказывают резко отрицательный эффект на водные экосистемы. В донных отложениях рек встречаются частицы отвалов и содержатся высокие концентрации подвижных в водной среде компонентов, представляя собой источник вторичного загрязнения рек.

Мировой опыт добавления в русло рек на ряде объектов измельчённого доломитового или чистого известняка при восстановительных работах на водотоках, в которые поступают кислые шахтные воды, показало, что это благоприятно влияет на химический состав и приводит в конечном итоге к восстановлению экосистем. Он перераспределяется вследствие энергии потока вниз по течению, нейтрализуя кислые шахтные воды.

Подобный метод подходит для восстановления экосистем рек КУБа. Применение щелочных реагентов целесообразно для нейтрализации кислых техногенных отложений и, соответственно, снижения подвижности железа, алюминия и тяжёлых металлов. В случае большой мощности техногенного осадка можно говорить о его консервации путём перекрытия щелочным реагентом и созданием своеобразного геохимического барьера, препятствующего вторичному загрязнению рек[1] [*Khayrulina et al.,* 2016].

В дальнейшем планируется на основании анализа всех источников загрязнения с помощью современных технологий, в т.ч. разработанной ГИС КУБ, и построения профилей изменения уклонов реки более детально изучить миграцию техногенных донных отложений как источника вторичного загрязнения с построением гидродинамических моделей, а также выделить оптимальные места добавления в поток реки щелочных реагентов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-50073 «Микрочастицы тяжёлых металлов в гидросфере промышленных районов: идентификация источников, закономерности миграции и накопления, экологический риск».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, project number 19-05-50073.

[1] *Максимович Н.Г.* Использование геохимических барьеров для очистки изливов кислых вод Кизеловского угольного бассейна. Инженерная геология, 2011. Сентябрь. С. 20–25

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Бессонова Е.П.* Геохимия техногенных систем. Новосибирск: Академическое издательство “Гео”, 2006. 169 с.
2. *Максимович Н.Г., Пьянков С. В.* Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения: монография. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. университет, 2018. 288 с.
3. *Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г.* Геохимические последствия влияния отходов башкирского медно-серного комбината на окружающую среду. Сергеевские чтения. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы утилизации и захоронения отходов. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М.: ГЕОС, 2005. Вып. 7. С. 162–167.
4. *Перельман А.И.* Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра, 1972. 287 с.
5. *Пьянков С.В., Березина О.А., Абдуллин Р.К., Тарасов А.В.* Геоэкологическая ГИС ликвидированного Кизеловского угольного бассейна: информационное наполнение и функциональные возможности. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2019. Т. 25. Ч. 1. С. 308–319. DOI: http://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-1-25-308–319.
6. *Тарасенко И.А.* Геохимические особенности состава и закономерности формирования подземных вод в природно-техногенных гидрогеологических структурах районов ликвидированных угольных шахт. М.: ГЕОС, 2018. 247 с.
7. *Янин Е.П.* Техногенные речные илы (вещественный состав, геохимические особенности, экологическая оценка). М.: ВИНИТИ РАН, 2013. 196 с.
8. *Blair R.D., Cherry J.A., Lim T.P., Vivyurka A.J.* Groundwater monitoring and contaminant occurance at an abandoned tailings area, Eliot Lake, Ontario. Proceedings of 1st International conference Uranium Mine Waste Disposal, May 19–21, 1980, Vancouver, British Columbia, Canada. Society of Mining Engineers of AIME. P. 911–944.
9. *Borman R.S., Watson D.M.* Chemical processes in abounded sulfide tailings dumps and environmental implications for Northeastern New Brunswick. Canadian Inst. Mining and Metallurgical Bulletin, 1976. V. 69. No 772. P. 86–96.
10. *Khayrulina E., Khmurchik V., Maksimovich N.* The Kizel Coal Basin (the Western Urals, Russia): Environmental problems and solutions. Mining Meets Water — Conflicts and Solutions. Proceedings IMWA 2016 Annual Conference, Freiberg, Germany, 2016. P. 761–767.
11. *Loop C.M., Scheetz B.E., White W.B.* Geochemical evolution of a surface mine lake with alkaline ash addition: field observations vs. laboratory predictions. Mine Water and the Environment, 2003. V. 22. No 4. P. 206–213.
12. *Ramstedt M., Carlsson E., Lovgren L.* Aqueous geochemistry in the Udden pit lake, Northern Sweden. Applied Geochemistry, 2003. V. 18. P. 97–108.
13. *Smith R.J.* Swifter action sough on food contamination. Science, 1980. V. 207. Iss. 4427. P. 163. DOI: 10.1126/science.6765994.
14. *Uhlmann W., Buttcher H., Totsche O., Steinberg C.* Buffering of acidic mine lakes: the relevance of surface exchange and solid-bound sulphate. Mine Water and the Environment, 2004. V. 23. P. 20–27.

REFERENCES

1. *Blair R.D., Cherry J.A., Lim T.P., Vivyurka A.J.* Groundwater monitoring and contaminant occurance at an abandoned tailings area, Eliot Lake, Ontario. Proceedings of 1st International conference Uranium Mine Waste Disposal, May 19–21, 1980, Vancouver, British Columbia, Canada. Society of Mining Engineers of AIME. P. 911–944.
2. *Borman R.S., Watson D.M.* Chemical processes in abounded sulfide tailings dumps and environmental implications for Northeastern New Brunswick. Canadian Inst. Mining and

Metallurgical Bulletin, 1976. V. 69. No 772. P. 86–96.
3. *Bortnikova S.B., Gas'kova O.L., Bessonova E.P.* Geochemistry of Technological Systems. Novosibirsk: Academic Publishing House «GEO», 2006. 169 p.
4. *Khayrulina E., Khmurchik V., Maksimovich N.* The Kizel Coal Basin (the Western Urals, Russia): Environmental problems and solutions. Mining Meets Water — Conflicts and Solutions. Proceedings IMWA 2016 Annual Conference, Freiberg, Germany, 2016. P. 761–767.
5. *Loop C.M., Scheetz B.E., White W.B.* Geochemical evolution of a surface mine lake with alkaline ash addition: field observations vs. laboratory predictions. Mine Water and the Environment, 2003. V. 22. No 4. P. 206–213.
6. *Maksimovich N.G., Pyankov S.V.* Kizel coal basin: environmental problems and solutions: a monograph. Perm: Perm University, 2018. 288 p. (in Russian).
7. *Perelman A.I.* Geochemistry of elements in the zone of hypergenesis. Moscow: Nedra, 1972. 287 p. (in Russian).
8. *Opekunov A.Yu., Opekunova M.G.* Geochemical consequences of the waste of the Bashkir copper-sulfur plant on the environment. Sergeyev readings. Engineering-geological and geoecological problems of waste disposal and burial. Proceedings of the Annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology. Iss. 7. Moscow: GEOS, 2005. P. 162–167 (in Russian).
9. *Pyankov S.V., Berezina O.A., Abdullin R.K., Tarasov A.V.* Geoecological GIS of the liquidated Kizel coal basin: information content and functionality. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2019. V. 25. Part 1. P. 308−319. DOI: http://doi.org/ 10.35595/2414-9179-2019-1-25-308-319 (in Russian, abs English).
10. *Ramstedt M., Carlsson E., Lovgren L.* Aqueous geochemistry in the Udden pit lake, Northern Sweden. Applied Geochemistry, 2003. V. 18. P. 97−108.
11. *Smith R.J.* Swifter action sough on food contamination. Science, 1980. V. 207. Iss. 4427. P. 163. DOI: 10.1126/science.6765994.
12. *Tarasenko I.A.* Geochemical features of the composition and patterns of groundwater formation in natural and technogenic hydrogeological structures of the areas of liquidated coal mines. Moscow: GEOS, 2018. 247 p. (in Russian).
13. *Uhlmann W., Buttcher H., Totsche O., Steinberg C.* Buffering of acidic mine lakes: the relevance of surface exchange and solid-bound sulphate. Mine Water and the Environment, 2004. V. 23. P. 20–27.
14. *Yanin E.P.* Technogenic river silts (material composition, geochemical features, environmental assessment). Moscow: VINITI RAS, 2013. 196 p. (in Russian).