

УДК 504.064

## ОСОБЕННОСТИ ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ СТАТУС ПРОМЫШЛЕННОГО КАНАЛА СТОЧНЫХ ВОД

Ушакова Евгения Сергеевна<sup>1</sup>,  
ushakova.evgeniya@gmail.com

Белкин Павел Андреевич<sup>1</sup>,  
pashabelkin@mail.ru

Дробинина Елена Викторовна<sup>1</sup>,  
alenadrobiniina@yandex.ru

<sup>1</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
Россия, 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15.

**Актуальность** исследования определяется необходимостью получения исходных данных для безопасного обращения с осадками, формирующимися в результате отстаивания сточных вод различного генезиса в крупном промышленном центре Западного Урала.

**Цель** настоящей работы заключается в характеристике химизма сточных вод промышленного канала и формируемых ими осадков, а также в определении экологического статуса и возможных вариантов обращения с осадками сточных вод.

**Объектом** исследования является промышленный канал, или канал транспорта сточных вод, г. Березники (Пермский край, Россия). Канал представляет собой искусственный водоток общей протяженностью 8,9 км. Он сформирован в середине прошлого века с целью защиты промышленной зоны г. Березники от подтопления и организации единой городской промышленной канализации. На современном этапе канал принимает в себя промышленные сточные воды ряда предприятий, а также сточные воды городских очистных сооружений и ливневые стоки. В устье канала действует станция очистки, после которой очищенные воды поступают в Камское водохранилище.

**Методы** исследования включают в себя определение макро- и микроэлементного состава сточных вод канала и его осадка с применением капиллярного электрофореза совместно с масс-спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Вместе с этим изучены микробиологические и радиологические показатели состояния осадка с применением установленных природоохранным законодательством РФ методик, проведено биотестирование проб осадка. Оценка геохимического состояния осадка и возможных экотоксикологических последствий от его загрязнения реализована с применением международных интегральных показателей, таких как индекс потенциального экологического риска, индекс геоаккумуляции, коэффициент качества осадка.

**Результаты.** Выполнена оценка уровня загрязнения сточных вод и осадка с использованием нормативных показателей и геохимических индексов. Изученные образцы осадка характеризуются умеренным содержанием токсичных элементов, безопасны в радиационном отношении и не проявляют признаков бактериального загрязнения. При этом уровень загрязнения осадка значительно возрастает к нижней части промканала. Осадки в нижней части промканала (перед очистными сооружениями) значительно обогащены всеми исследованными микроэлементами по сравнению с их средним содержанием в верхней части континентальной коры. Установлено, что уровень загрязнения осадка по Igeo в промканале изменяется от сильнозагрязненного до экстремально загрязненного. Наибольшие значения индекса геоаккумуляции (Igeo > 1000) зафиксированы в нижней части промканала. Значения индекса потенциального экологического риска в промканале изменяются от низкого до умеренного. Среднее значение коэффициента качества осадка показывает сильное загрязнение осадка в нижнем течении, при этом в среднем течении осадок сточных вод относится к категории незагрязненных. Проведен сравнительный анализ международных стандартов допустимых уровней содержания тяжелых металлов в осадках сточных вод для сельскохозяйственного использования. Проведена оценка возможных направлений использования осадков сточных вод, накопленных в промышленном канале города Березники. Наличие экстремально высоких концентраций хлоридов и микроэлементов в осадке сточных вод ограничивает его повторное использование. Это определяет необходимость дальнейшего поиска экологически безопасных способов применения и утилизации накопленного осадка. Перспективным направлением рециклинга накопленного осадка из промканала города Березники может стать разработка технологий производства строительных материалов.

### Ключевые слова:

сточные воды, осадок сточных вод, токсичные микроэлементы, хлоридное загрязнение, промышленный канал, Верхнекамское месторождение.

### Введение

Образование значительного объема соленых сточных вод обычно связано с деятельностью промышленных предприятий химической, фармацевтической и горнодобывающих отраслей, а также сельскохозяйственных и аквакультурных производств [1]. В частности, концентрация хлоридов в сточных водах нефтепромыслов может составлять 102 г/л [2], а содержание растворенных солей (по NaCl) в стоках за-

вода по производству вяленой соленой рыбы достигает 46 г/л [3]. Высокая миграционная способность хлорид-ионов в водной среде определяет возможность хлоридного засоления подземных вод. Так, в районе расположения прудов-отстойников предприятия по производству кальцинированной соды «Яникосода» (Польша), в которые поступают стоки с содержанием хлоридов до 200 г/л, зафиксирован рост концентрации хлорид-ионов в подземных водах до 16,5 г/л [4].

Сброс высокоминерализованных сточных вод хлоридного состава в природные объекты без должной очистки может привести к серьезному загрязнению окружающей среды и нанести ущерб водным, наземным и водно-болотным экосистемам [5, 6]. Закономерно, что наиболее актуальной проблемой является при добыче и переработке высокорастворимых полезных ископаемых, в частности месторождений солей. Так, засоление земель и пресноводных экосистем в результате производственных процессов разработки месторождения калийных солей зафиксировано в Тюрингии (Германия). Крупнейшая водная артерия региона – река Верра – десятилетиями являлась приемником высокоминерализованных сточных вод. Концентрация хлорид-ионов в речных водах ниже выпусков сточных вод в периоды наиболее интенсивных выпусков достигала 30 г/л, суммарное содержание растворенных солей превышало 50 г/л. В результате в течение длительного времени соленость нижнего течения р. Верры превышала соленость Северного моря [7, 8]. Засоление реки привело к снижению биоразнообразия и серьезным изменениям в составе водных сообществ [9, 10].

Крупнейшее в РФ Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей расположено в северной части Прикамья и является центром индустриального развития региона. На месторождении с 1930-х гг. осуществляется добыча сильвинита и карналлита. Сильвинит является сырьем для производства калийных удобрений, карналлит применяется в магниевой промышленности, насыщенные хлоридные рассолы применяют для производства кальцинированной соды, а также в различных технологических циклах предприятий химической промышленности Соликамско-Березниковской промышленной агломерации [11]. При производстве химической продукции образуется большое количество отходов. Так, например, при производстве одной тонны кальцинированной соды образуется около 10 м<sup>3</sup> жидкости, содержащей около 1 т хлоридов, 200 кг натрия и порядка 400 кг кальция [12].

Характерной особенностью водоотведения в городах Верхнекамья является поступление сточных вод от водопользователей до Камского водохранилища по системам малых водотоков [13]. Ярким примером техногенного воздействия на малые реки (рр. Толыч, Быгель, Зырянка) в г. Березники за счет точечных декларируемых и не декларируемых (диффузных) источников загрязнения является снижение качества вод по данным изучения абиотических и биотических показателей [14].

Для снижения техногенного воздействия на малые реки предпочтительным решением по очистке таких вод является централизованная схема со сбором большого объема стоков с разных предприятий на единых очистных сооружениях. Таким образом существенно снижаются издержки на дорогостоящую инфраструктуру, которая требует квалифицированного инженерного управления для обеспечения эффективной работы [15]. Примером такого решения является уникальный промышленный канал (промканал) от-

крытого типа, расположенный в городе Березники (в 180 км к северу от Перми – 59°24' с.ш., 56°45' в.д.), в который поступают промышленные стоки нескольких предприятий, а также коммунальные стоки и ливневые воды.

Учитывая продолжительность эксплуатации Березниковского промканала, насчитывающую несколько десятков лет, разнообразие поступающих в него стоков, большую массу накопленного осадка, цель настоящей работы заключается в характеристике химизма сточных вод промышленного канала и формируемых ими осадков, а также в определении экологического статуса и возможных вариантов обращения с осадками сточных вод. В задачи исследования входили характеристика химического состава сточных вод и их осадков на различных участках канала, санитарно-гигиеническая оценка осадков сточных вод и анализ возможностей использования или утилизации осадка сточных вод по результатам обобщения отечественного и зарубежного опыта.

#### Объект и методы исследования

Город Березники расположен в северной части Пермского края, является крупным центром химической и горнодобывающей промышленности Западного Урала. В настоящее время обширная промышленная зона г. Березники располагается в левобережной части р. Камы (верховье Камского водохранилища), в 1,5–2 км к северу и западу от городской застройки.

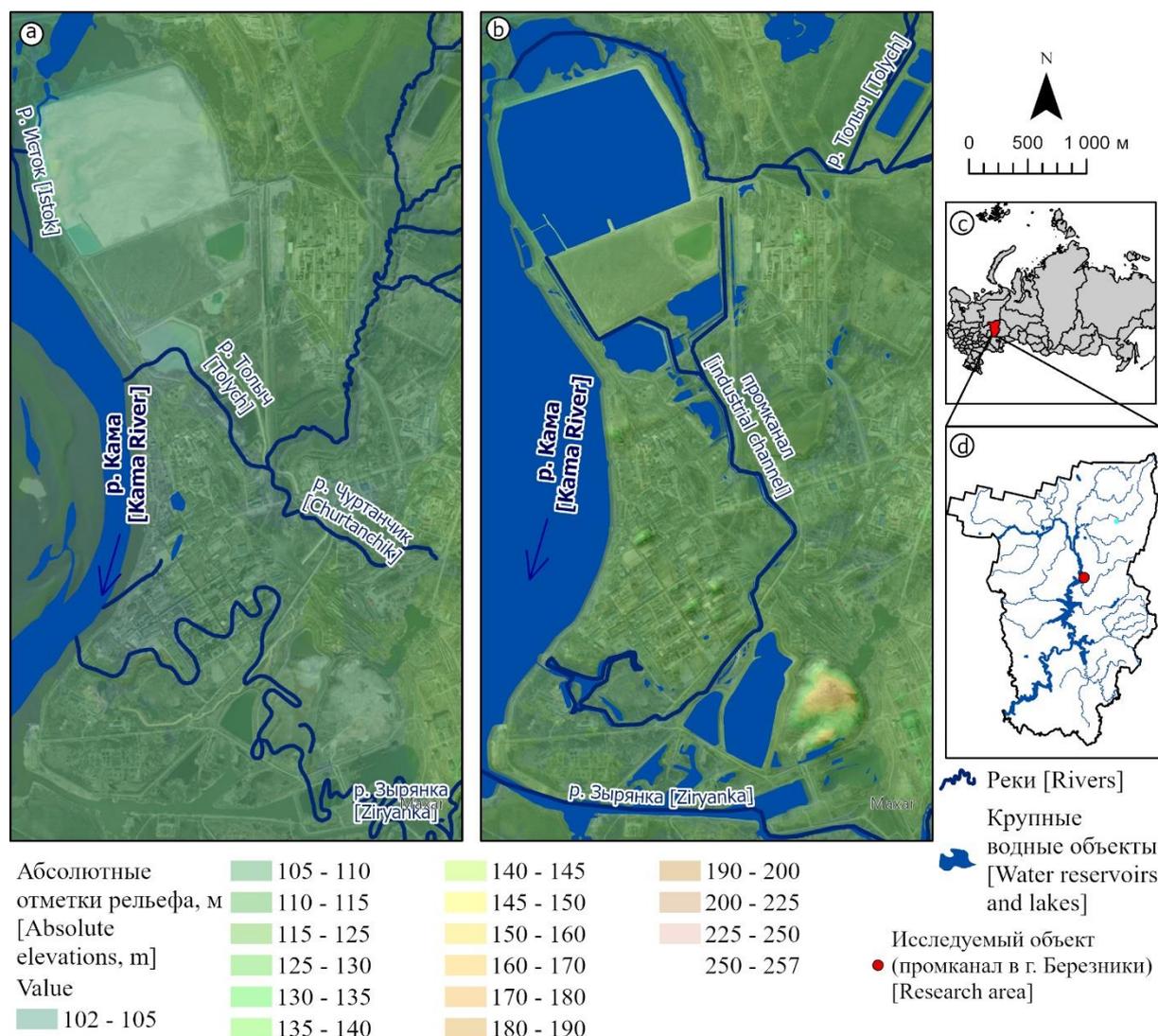
Предприятия западной части Березниковского промузла связывает промышленный канал, куда осуществляется сброс сточных вод ряда крупных промышленных предприятий. Образование этого канала связано с подъемом уровня воды р. Камы при строительстве Камской ГЭС, строительством защитной дамбы и последовавшей за ними перепланировкой территории.

Левобережье р. Камы в пределах современной территории промзоны г. Березники исторически характеризовалось низкими гипсометрическими отметками и заболоченностью. Населенные пункты Ленва, Усть-Зырянка, Дедюхино, располагавшиеся на левом берегу р. Камы до 1950-х гг., в период половодья частично затапливались и оказывались отрезанными от «большой земли» [16]. Так, для строительства Березниковского химического комбината (комплекс из азотно-тукового и содового производств, ТЭЦ), развернувшегося в 1929 г., были осуществлены мероприятия по подсыпке территории с подъемом поверхности на 2–4 м и устройству свайных полей.

Наиболее значительные изменения гидрографическая сеть левобережья Камы (рр. Зырянка, Толыч, Чуртанка и Исток) в районе города Березники претерпела при наполнении Камского водохранилища, стартовавшем в октябре 1953 г. [17]. Проектируемая отметка нормального подпорного уровня создаваемого водохранилища (108,5 м) превышала гипсометрические отметки рельефа изучаемой территории. С целью сохранения существовавших промышленных предприятий, расположенных вдоль береговой линии р. Камы, в рамках защитных мероприятий при строи-

тельстве Камской ГЭС была возведена ограждающая дамба. Эта дамба перекрыла устья рек Толыч и Зырянка. Таким образом новое устье р. Зырянки было вынесено за пределы сооружения (на 1 км южнее), а в старом, закрытом дамбой, была обустроена перекачивающая станция. Кроме того, старое русло р. Зырянки было объединено с руслом р. Толыч. В образовавшийся в результате объединения канал был организован сброс сточных вод прилегающих предприятий.

Направление верхнего и среднего течения р. Толыч впоследствии также было изменено в связи со строительством производственных объектов Березниковского содового завода (1960–1970-е гг.). Описанная схема сбора и отвода сточных вод действует на территории и в современный период (рис. 1). Таким образом, на протяжении уже нескольких десятков лет промканал выполняет роль транспортной артерии для сточных вод промышленного происхождения.



**Рис. 1.** Структура гидрологии изучаемой территории до (а) и после (б) наполнения Камского водохранилища; с, d – обзорная карта расположения изучаемого объекта

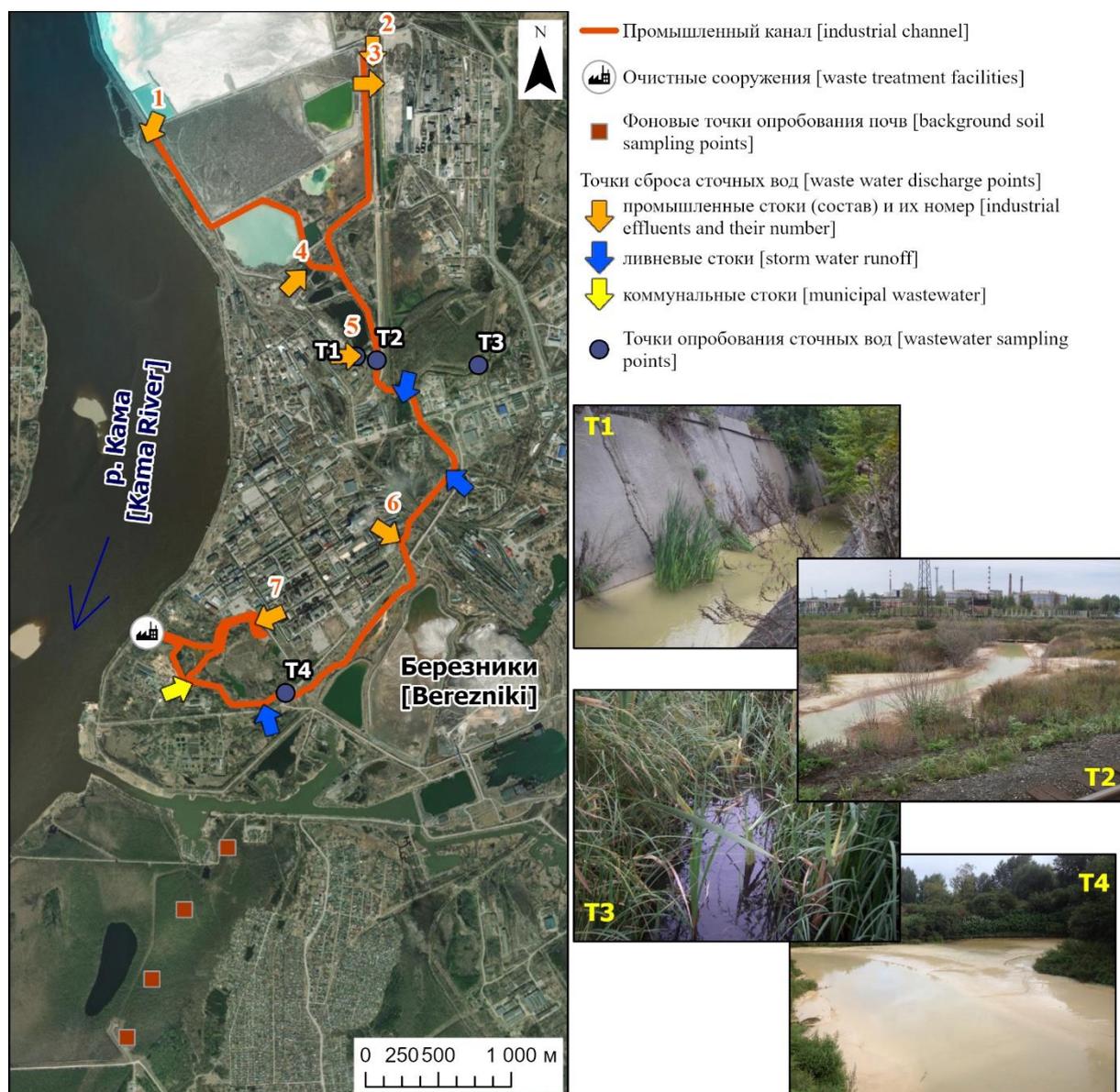
**Fig. 1.** Structure of the hydrological system of the study area before (a) and after (b) the filling of the Kama reservoir; c, d – overview map of the research area

В настоящее время в промканал поступают промышленные сточные воды с производственных предприятий химической и металлургической отраслей. Промышленные сточные воды в верхнем и среднем течении канала (№№ 1–5, рис. 2) поступают с предприятий по производству минеральных удобрений, кальцинированной соды, основной химии (щелочей, кислот) и титаномагниевого производства, использующих в технологических процессах руду и рассолы Верхнекамского месторождения. Ведущими раство-

ренными в этих стоках веществами являются хлориды и сульфаты калия, натрия, кальция, магния, а также соединения тяжелых металлов [18–23]. В нижнем течении в канал поступают промышленные стоки с предприятия азотной промышленности (№№ 6, 7), а также коммунальные сточные воды г. Березники после очистки на городских очистных сооружениях, в связи с чем состав сточных вод закономерно обогащается соединениями азота, а также органическими веществами.

Вместе с этим, поскольку промканал является открытым, в него попадают атмосферные осадки и ливневые стоки с площади водосбора около 100 км<sup>2</sup>. Поступление и смешивание вод различного генезиса, в

том числе насыщенных взвешенными веществами, приводит к накоплению в канале донного осадка. Схема поступления сточных вод в канал приведена на рис. 2.



**Рис. 2.** Современное расположение промканала г. Бerezники, положение точек поступления сточных вод и точек отбора проб; T1, T3 – фото точек опробования в коллекторах сбора сточных вод с прилегающей к каналу территории; T2, T4 – фото точек опробования в канале

**Fig. 2.** Current location of the Berezniki industrial channel, location of wastewater intake points and sampling points; T1, T3 – photo of sampling points in wastewater collectors from the territory adjacent to the channel; T2, T4 – photo of sampling points in the channel

Следует отметить, что промканал не является природным водным объектом, в связи с этим к составу вод в нем не применяются рыбохозяйственные и гигиенические нормативы. Нормирование и контроль состава вод осуществляется в водоприёмнике сточных вод – Камском водохранилище, куда они поступают после очистки на специализированных сооружениях (рис. 2). Вместе с этим промышленный канал открытого типа не является изолированным от внешней среды, а значительная часть его русла располо-

жена на общедоступной территории за пределами производственных площадок.

В настоящем исследовании проанализирован состав сточных вод и осадков сточных вод (ОСВ) на четырёх участках: в среднем и нижнем течении промышленного канала (точки опробования T2 и T4), а также в правом и левом притоках промканала, представляющих собой коллекторы сбора сточных и ливневых вод с прилегающих территорий (точки опробования T1 и T3) (рис. 2). Точка опробования T3 распо-

ложена на участке прежнего русла р. Толыч, по которому происходил сток до техногенных преобразований изучаемого участка (рис. 1). Принятая схема расположения участков опробования выбрана с целью характеристики изменений состава сточных вод и ОСВ в среднем и нижнем течении канала, а также оценки влияния ливневых вод с водосборной площади канала. Опробование производилось на общедоступных участках, за пределами производственных площадок действующих предприятий.

Полевые исследования на акватории промканала проводили в конце августа 2019 г. Отбор проб сточных вод и ОСВ на каждом участке выполнялся одновременно. Пробы сточных вод отбирали непосредственно из потока с глубины не менее 0,3–0,5 м. Для отбора проб сточных вод применяли химически инертную тару из полимерных материалов и непрозрачного стекла. Отбор проб осадка проводили в зонах его наибольшей аккумуляции из поверхностного слоя 0–5 см с применением пластиковых совков и размещали в таре из полимерных материалов. Все пробы после отбора были этикетированы и помещены в изотермические сумки для транспортировки в лабораторию при температуре 4–5 °С. Значение водородного показателя рН сточных вод определяли *in situ* с применением портативного рН-метра рН-410 (НПК Аквилон, Россия).

Химический анализ отобранных проб проводился в аккредитованных лабораториях г. Перми и г. Березники. Потенциометрическим методом определяли рН проб осадка, методом титрования, в соответствии с ГОСТ 31957-2012, определяли гидрокарбонаты, катионно-анионный состав сточных вод и осадков устанавливали методом капиллярного электрофореза с использованием прибора Капель-104 (Эконикс-Эксперт, Россия). Валовое содержание микроэлементов в пробах осадков определялось масс-спектральным методом с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на приборе AURORA M90 (Bruker, ФРГ). Для гамма-спектрометрического анализа использовался прибор Прогресс (Россия). Гравиметрическим методом определяли зольность осадков сточных вод в соответствии с ПНД Ф 16.2.2.2.3.3.29-02. Содержание органических соединений было проанализировано методами ИК-спектрометрии, ВЭЖХ и ГХ-МС. Экотоксикологическая оценка осадков произведена по изменению подвижности половых клеток млекопитающих *in vitro* ФР.1.31.2009.06301.

Вместе с исследованиями состава сточных вод и ОСВ для характеристики фоновых концентраций микроэлементов в депонирующих средах в районе г. Березники проведено опробование почвенного покрова. Фоновая площадка расположена в 1,5–2,5 км к югу от устья промышленного канала, на территории,

удаленной от крупных промышленных предприятий и покрытой условно-естественной растительностью (рис. 2). Почвенный покров представлен аллювиальными почвами легкого механического состава с щелочной реакцией среды. Отбор проб осуществляли методом конверта из верхнего горизонта (0–20 см). Лабораторное определение рН и валового содержания микроэлементов производили с применением методов анализа и приборной базы, аналогичных исследованиям ОСВ. Среднее арифметическое значение валовых концентраций микроэлементов в почвенном покрове было использовано в качестве местного фона.

Для сравнительной оценки обогащения осадков потенциально-токсичными элементами использован общепринятый механизм определения геохимической спецификации относительно эталона [24]. Оценка загрязнения осадка микроэлементами проводилась методом расчета *индекса потенциального экологического риска (Potential Ecological Risk Index, RI)*, предложенным Л. Хакансоном [25]. При оценке данным методом учитывается не только содержание тяжелых металлов в депонирующей среде, но и возможные негативные экотоксикологические последствия от загрязнения [26].

Индекс RI рассчитывается по следующей формуле:

$$RI = \sum E_r^i,$$

где  $E_r^i$  – коэффициент экологической опасности отдельного элемента. Расчет коэффициента экологической опасности производится по формуле:

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i,$$

где  $T_r^i$  – коэффициент токсичности  $i$ -го элемента, приведен для исследуемых элементов в табл. 1 по данным [27–30], а  $C_f^i$  – коэффициент загрязнения этим элементом, также рассчитываемый по формуле:

$$C_f^i = C_s^i / C_n^i,$$

где  $C_s^i$  – фактическое содержание элемента в исследуемом образце осадка, а  $C_n^i$  – фоновое содержание  $i$ -го элемента. Фоновые концентрации приводятся в табл. 1 по данным исследований проб почвенного покрова фоновой территории (рис. 2). Применение фоновых концентраций почвенного покрова при расчете RI позволяет оценить степень загрязнения ОСВ промканала применительно к возможности внесения осадков в почвенный покров.

Классификация загрязнения токсичными элементами на основании индекса RI имеет следующие критерии оценки:  $RI < 150$  – низкий экологический риск;  $150 \leq RI < 300$  – умеренный экологический риск;  $300 \leq RI < 600$  – высокий экологический риск;  $RI \geq 600$  – экстремально высокий экологический риск.

**Таблица 1.** Значения коэффициентов токсичности  $T_r^i$  в депонирующих средах по данным [27–30] и средние концентрации микроэлементов в почвенном покрове фоновой территории  $C_n^i$ , мг/кг

**Table 1.** Values of toxic-response factor  $T_r^i$  [27–30] and background concentrations of trace elements in soils of the background area  $C_n^i$ , mg/kg

	Li	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Hg	Pb
$C_n^i$	7,1	15,11	2,36	5,7	11,6	27,1	1,3	0,96	126,83	0,31	0,08	0,33	0,24	136,28	0,23	0,91	9,6
$T_r^i$	0	2	5	5	5	1	10	0	1	2	30	2	7	1	1	40	5

Вместе с RI производится расчет *индекса геоаккумуляции* ( $I_{geo}$ ), предложенного Г. Мюллером [31].  $I_{geo}$  широко применяется для оценки уровня загрязнения микроэлементами депонирующих сред: донных отложений природных водоёмов, почв, осадков сточных вод [32, 33]. Использование индекса геоаккумуляции позволяет оценить уровень загрязнения ОСВ отдельными элементами в сравнении с их кларками [34]. Расчет индекса производится по формуле:

$$I_{geo} = \log_2 \left( \frac{C_n}{1,5B_n} \right),$$

где  $C_n$  – концентрация элемента в ОСВ;  $B_n$  – геохимическая фоновая концентрация, принятая в настоящей работе по среднему содержанию элементов в верхней части континентальной коры по данным К. Ведеполья [35]. Коэффициент 1,5 является поправочным коэффициентом, обусловленным литосферными факторами.

Классификация загрязнения микроэлементами по значению  $I_{geo}$  проводилась по семи градациям [36]: класс 0:  $I_{geo} \leq 0$  – практически незагрязненные; класс 1:  $0 < I_{geo} \leq 1$  – от незагрязненных до умеренно загрязненных; класс 2:  $1 < I_{geo} \leq 2$  – умеренно загрязненные; класс 3:  $2 < I_{geo} \leq 3$  – от умеренно до сильно загрязненных; класс 4:  $3 < I_{geo} \leq 4$  – сильно загрязненные; класс 5:  $4 < I_{geo} \leq 5$  – от сильно загрязненных до чрезмерно загрязненных; класс 6:  $5 < I_{geo}$  – чрезмерно загрязненные.

Оценка качества осадка проведена с помощью расчетного *коэффициента PECQ* (*Probable Effect Concentration Quality*), предложенного К. Инджерсоллем с соавторами [37]. Метод основан на сравнении концентраций веществ в исследуемых пробах (С) с концентрациями вероятного эффекта этих веществ на организмы (*PEC* – *Probable Effect Concentration*). Значения PEC были приняты по Д. Мак Дональду с соавторами [38] и составляли (в мг/кг): Zn=459; Cu=146; Pb=128; Cd=4,98; Ni= 48,6; Cr = 111; As=33. Коэффици-

циент PECQ был рассчитан для семи изученных микроэлементов по формуле:

$$PECQ = \frac{\sum \frac{c}{PEC}}{n}.$$

Классификация проводилась по следующим критериям: если среднее значение PECQ не превышало 0,1, осадки оценивались как незагрязненные, при  $0,1 < PECQ \leq 1,0$  осадки умеренно загрязненные, в случае  $PECQ > 1,0$  осадки сильно загрязненные [39].

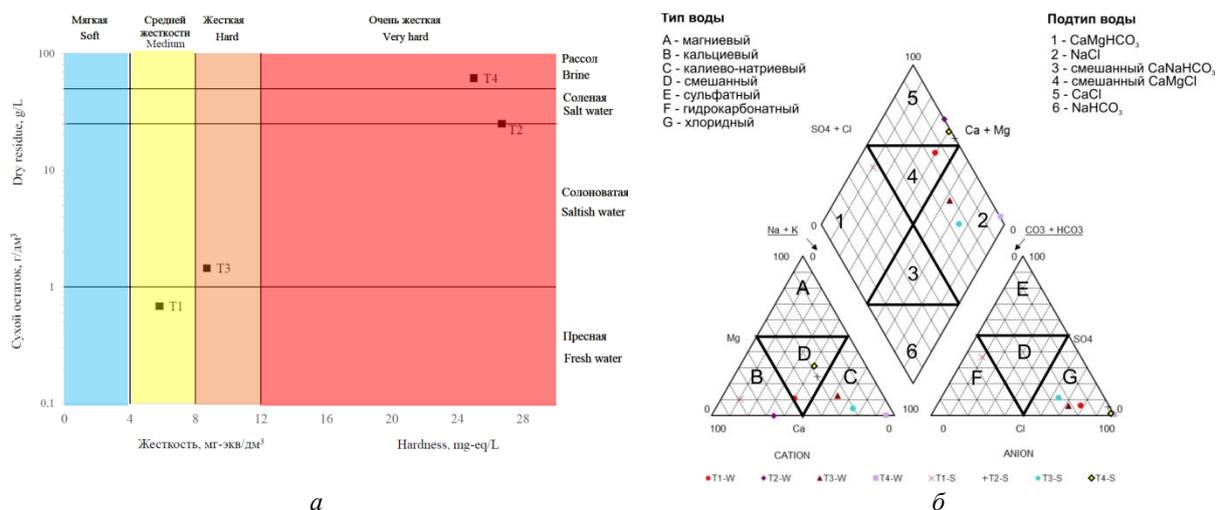
### Результаты исследования

#### Химическая классификация сточных вод и осадков

По ОСТ 41-05-263-86 [40] сточные воды промканала изменяются от сильно солоноватых (Т2) до слабых рассолов (Т4). Воды левого притока (Т1) пресные, правого притока Т3 весьма слабосолоноватые. По жёсткости сточные воды изменяются: так, сточные воды в промканале (Т2 и Т4) очень жесткие; ливневые воды в притоках жесткие (Т3) и средней жёсткости (Т1) [41]. Интегрированная классификация сточных вод по сухому остатку и жёсткости представлена на рис. 3, а.

Сточные воды в промканале (Т2 и Т4) характеризуются сильной щелочной реакцией, высокой концентрацией хлоридов (31 г/л), натрия (11 г/л) и кальция (0,4 г/л), в отличие от поступающих в них ливневых вод, где концентрации ионов ниже в 94 раза (Т1 и Т3).

Сточные воды и водная вытяжка из ОСВ по анионному составу хлоридные, за исключением точки опробования Т1, где тип воды хлоридный, а в осадке – гидрокарбонатный. По катионному составу преимущественно воды натриевые. В целом сточные воды и осадки соответствуют следующей гидрохимической фации –  $Ca^{2+}-Mg^{2+}$  и  $Cl-SO_4^{2-}$ . Общий химический состав водной вытяжки осадков отражает специфику гидрохимических фаций сточных и ливневых вод, в которых он сформировался (рис. 3, б).



**Рис. 3.** Классификация химического состава сточных вод и осадков: а) классификация сточных вод по сухому остатку и жесткости; б) химический состав проб воды (W) и вытяжек из донного осадка (S) на диаграмме Пайпера

**Fig. 3.** Classification of chemical composition of wastewater and sewage sludge: a) wastewater classification by TDS and hardness; б) chemical composition of water samples (W) and bottom sludge extracts (S) on the Piper diagram

Содержание микроэлементов в осадках и оценка степени загрязнения ОСВ

Микроэлементный состав осадков сточных вод Березниковского промканала и его притоков, изученный в точках опробования Т1–Т4 в сравнении с данными исследований осадков на очистных сооружениях в Турции [42], Польше [43], Италии [44] и Китае [45], приводится в табл. 2. Следует отметить, что исследованиями охвачены, как правило, осадки сточных вод муниципальных очистных сооружений.

Согласно проведенным исследованиям (табл. 2), концентрации микроэлементов в ОСВ промканала

характеризуются значительными колебаниями. Наибольшее содержание микроэлементов отмечается в нижнем течении промканала (Т4).

Сопоставление полученных данных с результатами исследований осадков сточных вод в других странах свидетельствует о пониженном содержании Ni, Zn, Cu, Cd и Pb в изучаемых ОСВ промканала г. Березники. Вместе с этим содержание As, Cr, Se, Sr Ba в ОСВ промканала существенно выше концентраций этих элементов в осадке сточных вод, например, поступающих с муниципальной станции очистки сточных вод Померанского воеводства в Польше [43].

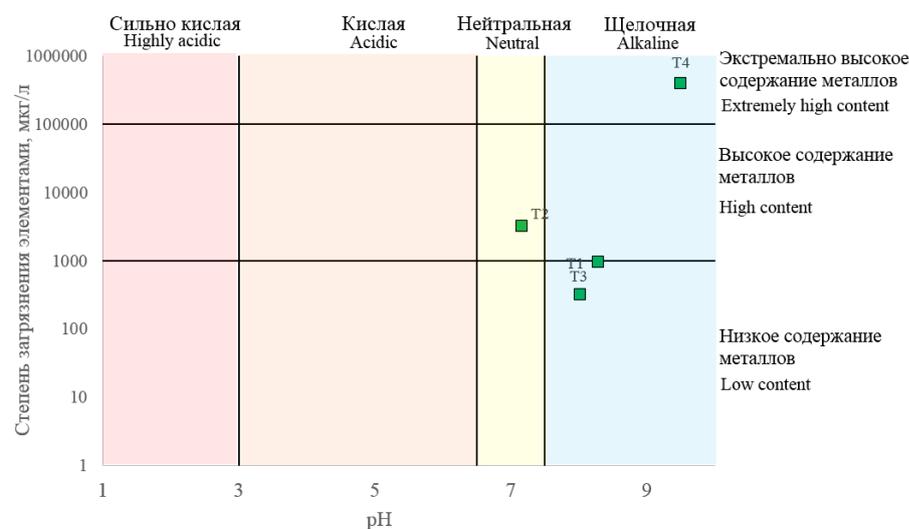
**Таблица 2.** Содержание микроэлементов в изученных пробах ОСВ промканала в сопоставлении с данными исследований в других странах, мг/кг

**Table 2.** Content of trace elements in sewage sludge in comparison with data from studies in other countries, mg/kg

Элемент Element	T1	T2	T3	T4	Турция Turkey [42]	Польша Poland [43]	Италия Italy [44]	Китай China [45]
Li	0,04	0,003	0,005	1,06	–	17,93	–	–
Cr	0,05	1,27	0,03	84,75	111,0	15,32	129,9	188,37
Co	0,007	0,007	0,002	31,52	–	–	–	–
Ni	0,02	0,05	0,008	34,21	75,0	53,85	71,4	56,22
Cu	0,05	0,30	0,012	32,99	–	113,28	335,2	259,0
Zn	0,05	0,31	0,01	55,53	1133,0	282,94	967,6	906,73
As	0,002	0,001	0,003	1,62	9,4	0,14	9,8	28,01
Se	0,0006	0,0009	0,0003	0,52	1,5	0,15	2,5	–
Sr	0,21	0,60	0,03	74,10	–	30,85	–	–
Mo	0,001	0,0006	0,0005	0,98	4,8	–	–	–
Cd	0,0002	0,0006	0,00001	0,07	1,7	1,16	1,0	10,78
Sn	0,002	0,0007	0,0006	0,11	–	–	–	–
Sb	0,0005	0,0004	0,0003	0,18	–	–	–	–
W	0,0005	0,0028	0,0004	0,37	–	–	–	–
Hg	0,0003	н/о	н/о	0,93	–	–	0,7	4,41
Ba	0,39	0,20	0,18	54,71	–	0,13	–	–
Pb	0,0193	0,0199	0,0033	18,13	–	23,92	54,9	81,74

Диаграмма Фиклика–Кабоя (рис. 4) была использована для классификации степени загрязнения ОСВ микроэлементами при сопоставлении их подвижности в различных кислотно-щелочных условиях [46]. Анализ данных диаграммы свидетельствует о пре-

имущественно щелочных условиях накопления осадков, и только в точке опробования Т2 среда нейтральная. Содержание микроэлементов в ОСВ значительно изменяется от низкого (Т3) до экстремально высокого содержания (Т4).



**Рис. 4.** Диаграмма Фиклика–Кабоя, иллюстрирующая степень загрязнения элементами по отношению к кислотно-щелочным условиям среды осадконакопления

**Fig. 4.** Ficklick–Caboy diagram illustrating the degree of elemental contamination in relation to the acid-alkaline conditions of the sedimentation environment

Оценка степени обогащения осадков относительно верхней части континентальной коры фиксирует значительное повышение концентрации относительно фона в нижнем течении промканала (рис. 5). При рассмотрении отдельных компонентов наибольшая степень обогащения в пробе Т4 фиксируется по содержанию ртути, общий ранжированный ряд по обогащению относительно верхней части континентальной коры:

$Hg > Se > Co > Cr > Cu > Ni > Zn > Pb > As > Mo > Cd > Sb > W > Ba > Li > Sn$ .

Нормализованные значения в верхней части промканала (Т2) коррелируют со значениями осадков ливневых вод старого русла р. Толыч (Т3), что в целом соответствует среднему обогащению. На нормированном графике хорошо заметно обогащение осадков в Т2 и Т3 по Cr, Cu и Se. Наименьшая степень обогащения отмечается в осадках ливневых вод с промзоны (Т1).

По результатам расчета индекса геоаккумуляции  $I_{geo}$  (рис. 6) чрезмерное загрязнение ( $I_{geo} > 5$ ) зарегистрировано в нижнем течении промканала (Т4) по всем исследуемым элементам, а также в среднем течении (Т2) по содержанию Cr, Cu, Se, Zn и Cd. Наиболее высокие значения  $I_{geo}$  в точке опробования Т1 были зарегистрированы по Se ( $I_{geo} > 5$ ) и Hg ( $4 < I_{geo} < 5$ ), что соответствует классу загрязнения от сильно до чрезмерно загрязненных осадков. Наименьшие значения  $I_{geo}$  зафиксированы в точке опробования Т3 и колебались между 3,7(Se) и 0,17(Co), что соответствует уровню загрязнения от сильно загрязненных до незагрязненных осадков.

Анализируя значения  $I_{geo}$  в ОСВ промканала, можно сделать вывод, что уровень риска загрязнения окружающей среды микроэлементами является экстремально высоким в Т4 с максимальной аккумуляцией Hg в осадках на этом участке промканала.

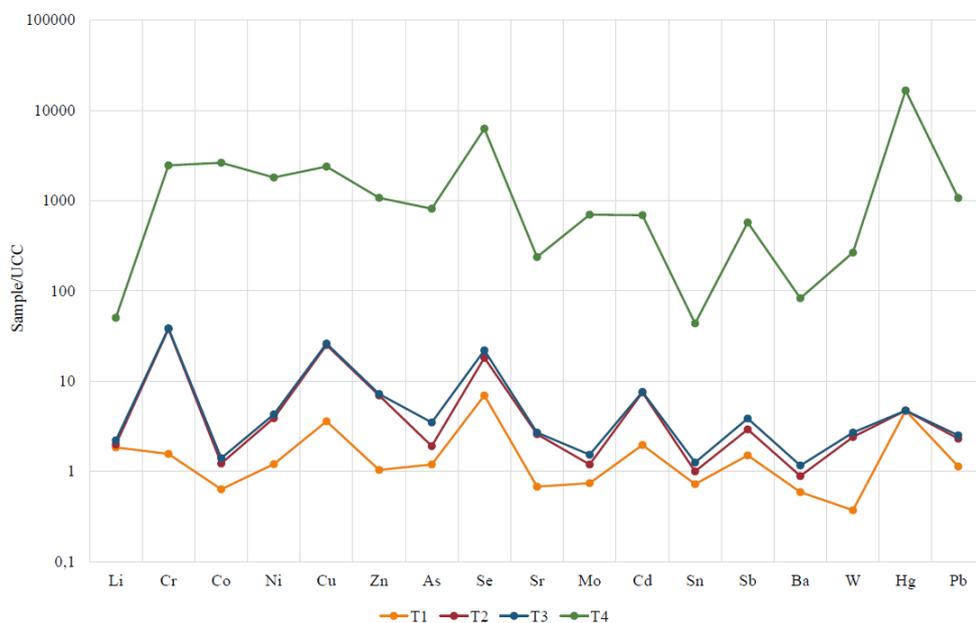


Рис. 5. Степень обогащения осадков промканала относительно верхней континентальной коры [35]

Fig. 5. Degree of enrichment of sewage sludge of the industrial channel relative to the upper continental crust [35]

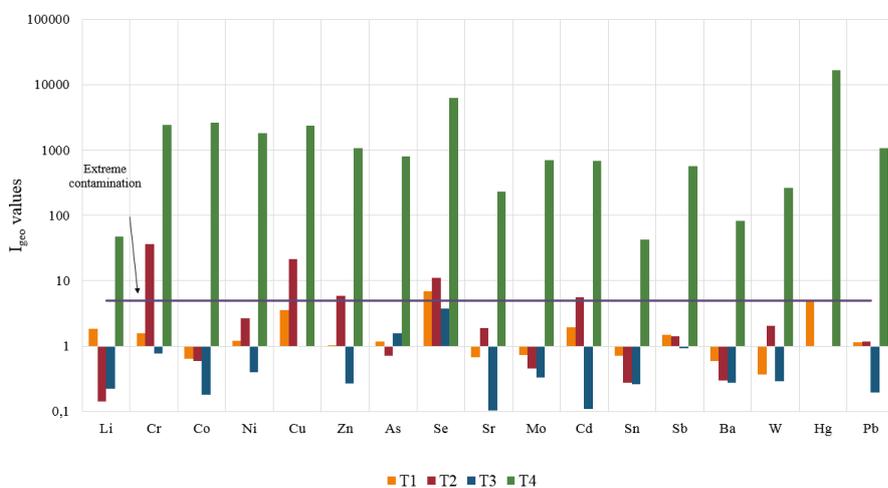
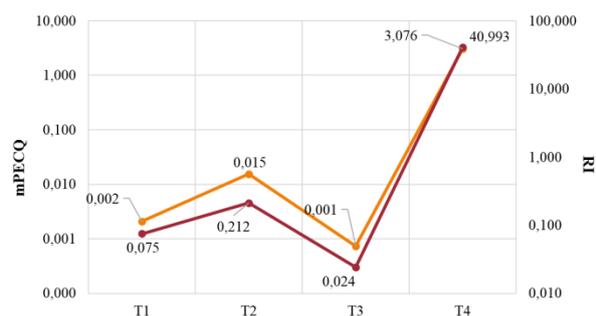


Рис. 6. Распределение значений индекса геоаккумуляции ( $I_{geo}$ ) в осадках промканала

Fig. 6. Distribution of values of the geoaccumulation index ( $I_{geo}$ ) in sewage sludge of industrial channel

Значения индекса потенциального экологического риска (RI) для микроэлементов в осадках представлены на рис. 7. Согласно расчету, значения RI варьировали от 0,06 до 173,04 (от низкого до умеренного экологического риска). Более опасная категория (умеренный экологический риск) фиксируется только в точке опробования Т4. Самые низкие средние значения RI установлены для точки опробования Т3 (ливневые сточные воды с площади водосбора старого русла р. Тольч). Коэффициент экологической опасности элементов ( $E_r^i$ ) в точке опробования Т4 снижался в следующем порядке:

$Hg > Ni > Cd > Cu > Co > As > Cr > Pb > Mo > Sb > Zn > W > Sn > Sr > Ba$ .



**Рис. 7.** Среднее значение PECQ и индекс потенциального экологического риска (RI) в осадках промканала

**Fig. 7.** Average PECQ value and potential ecological risk index (RI) in sewage sludge of industrial channel

Среднее значение PECQ микроэлементов варьировалось от 0,001 до 3,08 (рис. 7). Самые высокие и низкие средние значения PECQ коррелируют со значениями RI и наблюдаются, соответственно, в точках наблюдения Т4 и Т3. Наибольшее среднее значение PECQ в точке опробования Т4 характеризует осадки

как сильно загрязненные, ОСВ на других участках обследования соответствуют категории незагрязненных.

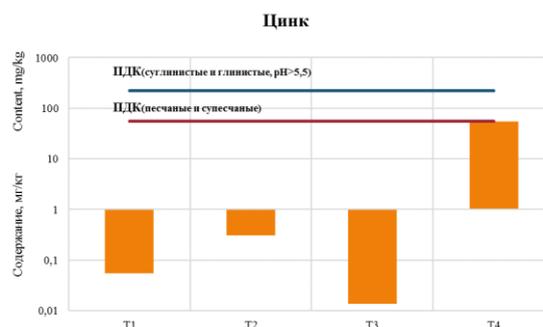
Оценка степени загрязнения осадка согласно природоохранным нормативам

Оценка химического загрязнения осадка произведена в соответствии с российскими природоохранными нормативами по содержанию микроэлементов в почвенном покрове (СанПиН 1.2.3685-21).

Соответствие концентраций в осадке указанному документу позволяет внесение осадка в грунт и почву при технических и мелиоративных мероприятиях. В результате сопоставления выявлено, что концентрации большинства нормируемых веществ соответствуют нормативным требованиям, исключение из этого ряда составляет содержание цинка и никеля (рис. 8). При этом достижение содержания, эквивалентного 1,0 и 1,7 ПДК, соответственно, наблюдается при оценке относительно почв супесчаного и песчаного механического состава. Предельные концентрации Zn и Ni для суглинистых и глинистых почв в исследуемом осадке не обнаружены.

Оценка санитарного состояния ОСВ промканала по дополнительным показателям

В пробе из нижнего течения промканала (Т4), характеризующейся наибольшей степенью загрязнения, проведены дополнительные исследования по перечню показателей, соответствующему российским природоохранным нормативам. В частности, проведено изучение активности естественных радионуклидов ( $^{40}K$ ,  $^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$ ), содержания органических веществ (нефтепродуктов, бенз(а)пирена, фенолов). Кроме того, определен индекс БГКП (бактерий группы кишечной палочки), зольность осадка и индекс токсичности с применением биотестирования.



**Рис. 8.** Сравнение концентраций Zn и Ni в осадке с ПДК для почв по СанПиН 1.2.3685-21

**Fig. 8.** Comparison of Zn and Ni concentrations in sewage sludge with the maximum permissible concentrations for soils in Russia

Удельная активность природных радионуклидов в пробе ОСВ составляет:  $^{40}K$  – 244,4 Бк/кг,  $^{226}Ra$  – 7,5 Бк/кг,  $^{232}Th$  – 11,0 Бк/кг, что незначительно превышает значения в почве и донных отложениях в пределах территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей [47]. При этом в сравнении со средними мировыми значениями [48] содержание природных радионуклидов в ОСВ из промканала ниже: в 4,3 раза по  $^{226}Ra$ , в 4,1 раза по  $^{232}Th$  и в 1,7 раза по  $^{40}K$ .

Суммарное содержание нефтепродуктов в пробе Т4 составило 4600 мг/кг, что в 4,6 раз превосходит допустимый уровень в соответствии с российским природоохранным законодательством. При этом содержание бенз(а)пирена и фенолов в пробе осадков не превысило предела чувствительности аналитических методов (<0,005 и <0,001 мг/кг, соответственно). Бактериологическая оценка на основании показателя индекса БГКП=1,0 кл/г свидетельствует об эпидемиологической безопасности ОСВ.

Испытание водных вытяжек ОСВ выполнено на основании методики измерений индекса токсичности почв, почвогрунтов, вод и отходов по изменению подвижности половых клеток млекопитающих *in vitro*. Биотест показал безопасность водных вытяжек ОСВ для клеток теплокровных животных, поскольку индекс токсичности составил 83,1 %, что соответствует установленной методикой диапазону оптимальной подвижности сперматозоидов ( $80 \% < I_T < 120 \%$ ). Таким образом, по результатам биотестирования на сперме быка ОСВ относится к V классу опасности (нетоксичные) согласно Постановлению № 536 Минприроды или к IV классу опасности (малоопасные) согласно СП 2.1.7.1386-03.

В соответствии с ГОСТ Р 59748-2021, основным требованием получения продукта из ОСВ является показатель зольности не менее 65 %. Высокое значение зольности свидетельствует, что ОСВ – это смесь органических и минеральных веществ [49]. В результате выполненных исследований установлено, что осадок из нижнего течения промканала соответствует требованиям для получения материала рекультивантов, поскольку показатель зольности в пробе Т4 составил 92 %.

### Обсуждение результатов

#### Мировой опыт использования осадков сточных вод

По данным Росводоканала, в России ежегодно образуется 7–8 млн т ОСВ. Образованные осадки направляются на утилизацию. Так, осадки сточных

вод в Санкт-Петербурге уплотняются, механически обезвоживаются, собираются в накопителях и утилизируются путем сжигания [50, 51].

Степень диверсификации в обращении с осадками сточных вод во многих странах существенно выше. Так, в 2021 г. в США было произведено 4,5 млн т сухого ОСВ, из которых: 1,15 млн т внесено на сельскохозяйственные угодья, 35 тыс. т внесено на рекультивационные площадки, 796 тыс. т нашли другое применение при землеустройстве (ландшафтный дизайн, поля для гольфа и т. д.); 633 тыс. т подвергли сжиганию, 1,8 млн т – захоронению на полигоне ТКО, 95 тыс. т – захоронению на монополигоне; другие методы утилизации применили в отношении 57 тыс. т (закачка в глубокое скважины и др.) [52]. В то же время в Канаде ежегодно производят 660 тыс. т сухих ОСВ, доступных для использования в сельском хозяйстве [53].

В Европе основными производителями ОСВ являются Германия, Испания и Франция, где ежегодно образуется 1,74; 1,19 и 1,17 млн т, соответственно [54]. В настоящее время в Европе основными способами утилизации ОСВ являются: использование в сельском хозяйстве (Ирландия и Норвегия), сжигание (Нидерланды, Бельгия и Австрия) и размещение на свалках (Турция и Румыния) (рис. 9). Вместе с этим ОСВ находят применение в зеленых зонах и лесном хозяйстве (Ирландия, Латвия и Словакия) [55], в производстве строительных материалов для дорожного строительства (Польша) [56].

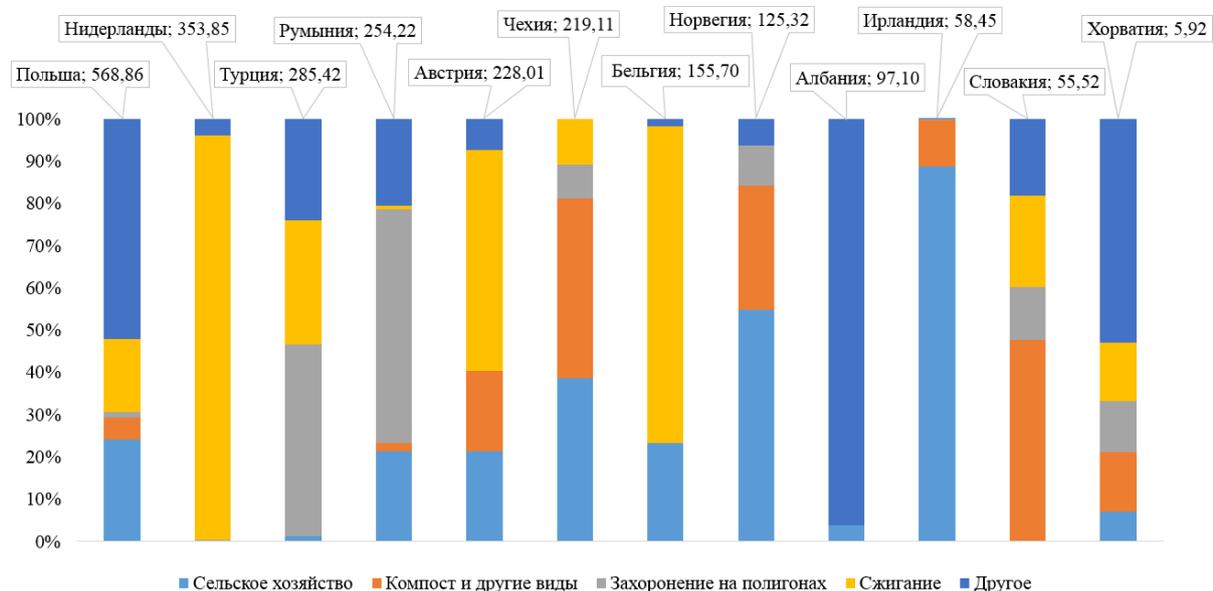


Рис. 9. Применение и утилизация ОСВ в странах ЕС в 2020 г. (страна, тыс. т)

Fig. 9. Use and disposal of sewage sludge in the EU in 2020 (country, thousand tons)

В одной из крупнейших в мире стран – Китае – к 2019 г. объемы образования осадков достигли 39,04 млн т в год. Основные направления утилизации осадков, применяемые в Китае: сжигание (45,11 %) > утилизация на свалках (23,04 %) > внесение в землю (17,64 %) > производство строительных материалов (14,21 %) [57]. В производстве строительных материалов ОСВ в Китае

используются как основа для изготовления кирпича, керамзита и бетона [58]. Кроме очевидной пользы, связанной с замещением природных строительных материалов, наблюдается побочный экологический эффект. Так, тяжелые металлы, содержащиеся в канализационных отложениях или осадках сточных вод, могут быть эффективно иммобилизованы в керамзите [59].

Возможные ограничения при использовании ОСВ

Одним из ведущих требований к ОСВ в рамках концепции циркулярной экономики является соответствие осадков требованиям к уровню микроэлементов при рассмотрении их использования в сельском хо-

зяйстве, зеленых зонах или лесном хозяйстве [60]. При этом нормативные значения в отношении управления ОСВ во всем мире зависят от нормативных актов каждой страны и региона (табл. 3).

**Таблица 3.** Нормативные значения содержания микроэлементов в осадке сточных вод, предназначенном для внесения в природную среду, мг/кг [34, 61]

**Table 3.** Limit values of the trace elements in the sewage sludge for agricultural use and their mean contents in other countries, mg/kg [34, 61]

Элементы Elements	Польша Poland	ЕС EU	Китай/China		США USA	Канада Canada	ЮАР South Africa
			pH<6,5	pH>6,5			
Cd	20	20–40	5	20	39	1,25	40
Ni	300	300–400	100	200	420	–	420
Zn	2500	2500–4000	500	1000	2800	2000	2800
Cu	1000	1000–1750	250	500	1500	500	1500
Cr	500	–	600	1000	–	1000	1200
Pb	750	750–1200	300	1000	300	200	300

Ограничения при обращении с ОСВ в России определяются нормативными документами: ГОСТ Р 54534-2011 при использовании в качестве рекультиванта и ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 при внесении в качестве удобрений. Следует отметить, что настоящие стандарты предназначены исключительно для осадков, образующихся в процессе очистки хозяйственно-бытовых и городских стоков, а также близких к ним по составу производственных сточных вод.

Концентрация микроэлементов является ограничивающим фактором не только при внесении в компоненты окружающей среды, но также и при термической обработке ОСВ. Ранее проведенные исследования свидетельствуют о необходимости комплексного контроля выбросов тяжелых металлов при сжигании и прокаливании ОСВ [62].

Наряду с содержанием микроэлементов, использование осадка в сельском хозяйстве может быть существенно ограничено высоким содержанием водорастворимых солей. Так, использование в сельском хозяйстве ОСВ с экстремальным содержанием хлоридов (12–19 г/кг), является невозможным, поскольку избыток Cl<sup>-</sup> может вызывать нарушения в ионной системе растения, вызванные ограниченным поглощением K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, и NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Вместе с этим осаждение сильно засоленных взвесей в прудах-отстойниках или каналах, расположенных непосредственно на пронизываемых грунтах, способствует засолению грунтовых вод и почв, что показано при исследованиях в Польше [4].

Пути обращения с осадками сточных вод  
 Березниковского промканала

Преимущественное присутствие сточных вод с высоким содержанием Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup> и Na<sup>+</sup> в промканале г. Березники связано с технологией производства прилегающих предприятий, где исходным сырьем являются рассолы или калийная руда Верхнекамского месторождения, известняки с ближайших месторождений [63, 64].

Результаты расчетов эколого-геохимических показателей выявили различную степень загрязнения микроэлементами в осадках. В нижнем течении

промканала (Т4) на основании высоких концентраций микроэлементов в осадках зафиксирован наибольший уровень загрязнения относительно других точек опробования. Помимо высокого уровня загрязнения микроэлементами в Т4, в этой точке отмечается экстремальное содержание хлоридов в ОСВ, которое наблюдается и в среднем течении промканала (Т2).

Вместе с этим содержание токсичных микроэлементов в составе осадка даже в точке Т4 существенно ниже, чем в аналогичных объектах Турции, Польши, Италии и Китая. Также исследованиями показана радиологическая безопасность осадка, отсутствие острой токсичности и бактериологического загрязнения, умеренное содержание нефтепродуктов.

Длительное использование промканала привело к образованию значительной мощности осадков, которые могут повлиять на снижение скорости потока и пропускной способности канала. Учитывая открытый тип исполнения канала, поступление большого количества осадков либо аварийные сбросы потенциально могут привести к переполнению канала и разливу сточных вод на прилегающую территорию.

Указанные факты говорят о необходимости поиска экологически безопасных способов применения и утилизации накопленного осадка. Выемка и захоронение осадка на специализированных полигонах является крайне затратным мероприятием. Высокое содержание хлоридов исключает применение его в сельскохозяйственной сфере. Учитывая мировой опыт обращения с ОСВ, а также невысокое содержание в осадке токсичных микроэлементов, перспективным направлением может являться разработка технологий переработки осадка из промканала города Березники в строительные материалы.

### Заключение

Промышленный канал города Березники является техногенным объектом с большой историей. С 1950-х гг. он принимает в себя стоки нескольких крупных промышленных предприятий. Использование канала предусматривает механическую очистку сточных вод и перекачку их в Камское водохранилище в относительно очищенном виде. Вместе с этим при отстаива-

нии и очистке сточных вод образуется большой объем осадков сточных вод. Эти осадки заполняют ложе канала и занимают значительный объем. При отсутствии специальных мероприятий по выемке и использованию или захоронению осадков неизбежна ситуация, когда количество накопленных осадков создаст угрозу функционированию этого объекта.

Изучение состава осадков свидетельствует о преимущественной роли хлоридов кальция, натрия и калия в составе накопленных отложений. Геохимическая специфика осадков соответствует составу сточных вод с предприятий, которые перерабатывают запасы Верхнекамского месторождения солей. Сточные воды преимущественно щелочные, жесткие, в их составе доминируют хлорид-ионы, а также натрий и кальций. Формирующийся осадок сточных вод закономерно характеризуется преобладанием хлоридов кальция, натрия и калия в составе накопленных отложений. В микроэлементном составе относительно кларка верхней части континентальной коры осадки обогащены ртутью, селеном, кобальтом, хромом, никелем, медью и рядом других веществ, причем осадки из нижнего течения канала характеризуются более высокими концентрациями токсичных элементов. Так, согласно расчету индекса геоаккумуляции  $I_{geo}$ , проба ОСВ из нижнего течения канала характеризуется категорией «чрезмерное загрязнение» по содержанию всех 17 исследованных веществ. В среднем течении канала сопоставимый уровень загрязнения определен по содержанию Cr, Cu, Se, Zn и Cd. Необходимо отметить, что привнос тяжелых металлов происходит и с ливневыми водами. Так, степень обогащения донных осадков из сборников ливневых вод, опробованных в точках Т1 и Т3, селеном и ртутью соответствует классу загрязнения от сильно до чрезмерно загрязненных осадков.

В то же время рассчитанный с применением местного фона потенциальный экологический риск (RI)

микроэлементов в осадках характеризуется как низкий в средней части канала и умеренный в нижнем течении. Согласно расчету качества осадка РЕСО, наблюдается сильное загрязнение осадка в нижнем течении, при этом в среднем течении ОСВ относится к категории незагрязненных.

В целом применение расчетных индексов показывает значительную степень обогащения осадков микроэлементами относительно природных объектов, однако относительно невысокую в сравнении со схожими образованиями и местным фоном. Так, в сопоставлении с данными изучения ОСВ на станциях очистки муниципальных стоков в различных странах изученные образцы осадка характеризуются умеренным содержанием токсичных элементов (которое, однако, повышается в нижнем течении канала). Также настоящими исследованиями показано, что ОСВ безопасны в радиационном отношении и не проявляют признаков бактериального загрязнения.

Результаты исследований позволяют определить разработку технологий производства строительных материалов как наиболее перспективное направление возможного использования накопленного осадка из промканала города Березники. Перспективы продолжения исследований осадка промышленного канала связаны с количественным расчетом мощности накопленных отложений, определении оставшейся ёмкости промышленного канала и разработкой технологий переработки осадка.

*Исследования проведены при поддержке гранта Президента РФ № МК-4377.2022.1.5.*

*Авторы выражают благодарность Сектору наноминералогии Центра коллективного пользования Пермского государственного национального исследовательского университета за проведение лабораторных аналитических исследований.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Biotreatment of high-salinity wastewater: current methods and future directions / Y. Zhao, X. Zhuang, S. Ahmad, S. Sun, S.-Q. Ni // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. – 2020. – V. 36. – Article number 37. URL: <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02815-4> (дата обращения 15.12.2022).
2. AlJaber F. Y., Ahmed S. A., Makki H. F. Electrocoagulation treatment of high saline oily wastewater: evaluation and optimization // *Heliyon*. – 2020. – V. 6. – Iss. 6. – Article number e03988. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03988> (дата обращения 15.12.2022).
3. Ching Y. C., Redzwan G. Biological treatment of fish processing saline wastewater for reuse as liquid fertilizer // *Sustainability*. – 2017. – V. 9 (7). – Article number 1062. URL: <https://doi.org/10.3390/su9071062> (дата обращения 15.12.2022).
4. Golub A., Piekutin J. Pollution of sedimentary ponds at an industrial plant in Janikowo (Poland) // *Water*. – 2020. – V. 12 (2). – Article number 536. URL: <https://doi.org/10.3390/w12020536> (дата обращения 15.12.2022).
5. Review of chloride ion detection technology in water / D. Wu, Y. Hu, Y. Liu, R. Zhang // *Applied Sciences*. – 2021. – V. 11 (23). – Article number 11137. URL: <https://doi.org/10.3390/app112311137> (дата обращения 15.12.2022).
6. Экологическая безопасность освоения месторождений полезных ископаемых: монография / под общ. ред. Е.А. Хайруллиной. – Пермь: ПГИУ, 2022. – 175 с.
7. Bâthe J., Coring E. Biological effects of anthropogenic salt-load on the aquatic fauna: a synthesis of 17 years of biological survey on the rivers Werra and Weser // *Limnologia*. – 2011. – V. 41 (2). – P. 125–133. URL: <https://doi.org/10.1016/j.limn.2010.07.005> (дата обращения 15.12.2022).
8. Salinisation of rivers: an urgent ecological issue / M. Cañedo-Argüelles, B.J. Kefford, C. Piscart, N. Prat, R.B. Schäfer, C.J. Schulz // *Environmental Pollution*. – 2013. – V. 173. – P. 157–167. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.10.011> (дата обращения 15.12.2022).
9. Braukmann U., Böhme D. Salt pollution of the middle and lower sections of the river Werra (Germany) and its impact on benthic macroinvertebrates // *Limnologia*. – 2011. – V. 41. – P. 113–124. URL: <https://doi.org/10.1016/j.limn.2010.09.003> (дата обращения 15.12.2022).
10. Schulz C.-J., Cañedo-Argüelles M. Lost in translation: the German literature on fresh water salinization // *Philosophical Transactions the Royal Society B*. – 2019. – V. 374. – Article number 20180007. URL: <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0007> (дата обращения 15.12.2022).
11. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей. – М.: Эпсилон Плюс, 2013. – 368 с.
12. Мировой опыт использования отходов производства соды / С.А. Красильникова, С.М. Блинов, П.А. Красильников, П.А. Белкин // *Экология и промышленность России*. – 2021. – Т. 25. – № 12. – С. 48–53. URL: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-12-48-53> (дата обращения 15.12.2022).
13. Лепихин А.П., Мирошниченко С.А. Техногенное воздействие Соликамско-Березниковского промузла на поверхностные водные объекты // *Горный журнал*. – 2008. – № 10. – С. 92–96.

14. Экогеохимическая и биондикационная оценка загрязнения малых рек города Березники / Е.С. Ушакова, П.А. Белкин, М.А. Бакланов, Е.В. Дробинина, А.Ю. Пузык // Вестник Пермского университета. Геология. – 2022. – Т. 21. – № 4. – С. 384–393. URL: <https://doi.org/10.17072/psu.geol.21.4.375> (дата обращения 15.12.2022).
15. Wastewater discharge standards in the evolving context of urban sustainability – the case of India / T. Schellenberg, V. Subramanian, G. Ganeshan, D. Tompkins, R. Pradeep // *Frontiers in Environmental Science*. – 2020. – V. 8. – Article number 30. URL: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00030> (дата обращения 15.12.2022).
16. Жданов А.Ф. Березники – город уральских химиков. – Молотов: Молотовское книжное издательство, 1956. URL: <https://libking.ru/books/sci-/sci-history/1146465-aleksandr-zhdanov-berezniki-gorod-u-ralskih-himikov.html> (дата обращения 15.11.2022).
17. Правила использования водных ресурсов Камского и Воткинского водохранилищ на р. Каме. Утв. приказом Федерального агентства водных ресурсов от 07.11.2016 № 255.
18. Способ очистки сточных вод титано-магниевого производства: пат. Рос. Федерация, № 2141456, заявл. 06.11.1998; опубл. 20.11.1999. – 5 с.
19. Крепышева И.В., Рудакова Л.В., Козлов С.Г. Физико-химические и токсикологические свойства шлама содового производства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 1. – С. 335–342.
20. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 8-2015. Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях. – М.: Бюро НДТ, 2015. – 129 с.
21. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 2-2019. Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот. – М.: Бюро НДТ, 2015. – 836 с.
22. Утилизация промышленных стоков титаномагниевого производства / Н.А. Куленова, З.М. Ахметвалиева, С.В. Мамяченко, О.С. Анисимова // *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya*. – 2019. – Т. 1. – С. 25–33. URL: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2019-1-25-33> (дата обращения 15.12.2022).
23. Физико-химические основы комбинированной энергоресурсоэффективной технологии переработки стоков производства кальцинированной соды / В.П. Мешалкин, Н.С. Шулаев, Н.А. Быковский, В.М. Аристов // Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах. – 2020. – Т. 494. – № 1. – С. 45–49. URL: <https://doi.org/10.31857/S268695352005009X> (дата обращения 15.12.2022).
24. Экогеохимическая оценка рек Ярлы-Амры и Чибитка, расположенных в ороле действия Акташского ртутного месторождения и его отвалов (Горный Алтай) / И.Н. Мягкая, Б.Ю. Сарыг-оол, И.С. Кириченко, М.А. Густайтис, Е.В. Лазарева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 4. – С. 7–26. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3273> (дата обращения 15.12.2022).
25. Nakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach // *Water Research*. – 1980. – V. 14. – Iss. 8. – P. 975–1001. URL: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8) (дата обращения 15.12.2022).
26. Ушакова Е.С., Каравая Т.И., Белкин П.А. Экологическое состояние почв промышленных территорий (на примере г. Березники, Пермский край): сравнение отечественных и зарубежных методов оценки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 58–70. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/10/2850> (дата обращения 15.12.2022).
27. Calculation and application of Sb toxicity coefficient for potential ecological risk assessment / N. Wang, A. Wang, L. Kong, M. He // *Science of the Total Environment*. – 2018. – V. 610–611. – P. 167–174. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.268> (дата обращения 15.12.2022).
28. Jeong H., Ra K. Investigations of metal pollution in road dust of steel industrial area and application of magnetic separation // *Sustainability*. – 2022. – V. 14. – Article number 919. URL: <https://doi.org/10.3390/su14020919> (дата обращения 15.12.2022).
29. Distribution of trace elements, rare earth elements and ecotoxicity in sediments of the Kosva Bay, Perm Region (Russia) / E. Ushakova, E. Menshikova, S. Blinov, S. Vaganov, R. Perevoshchikov // *Journal of Ecological Engineering*. – 2022. – V. 23. – № 4. – P. 1–16. URL: <https://doi.org/10.12911/22998993/146269> (дата обращения 15.12.2022).
30. The content and sources of potentially toxic elements in the road dust of Surgut (Russia) / D. Moskvchenko, R. Pozhitkov, A. Soromotin, V. Tyurin // *Atmosphere*. – 2022. – V. 13 (1). – Article number 30. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos13010030> (дата обращения 15.12.2022).
31. Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river // *GeoJournal*. – 1969. – V. 2. – P. 108–118.
32. Донные отложения рек техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса: сравнительная оценка уровня загрязнения тяжелыми металлами по отечественным и зарубежным критериям / В.Е. Закруткин, В.Н. Решетняк, О.С. Решетняк, Е.В. Гибков // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2021. – Т. 85. – № 4. – С. 554–564. URL: <https://doi.org/10.31857/S2587556621040130> (дата обращения 15.12.2022).
33. Risk analysis of heavy metals migration from sewage sludge of wastewater treatment / R. Kowalik, J. Gawdzik, P. Bak-Patyna, P. Ramiaczek, N. Jurišević // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2022. – V. 19 (18). – Article number 11829. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph191811829> (дата обращения 15.12.2022).
34. Tytla M., Widziewicz-Rzońca K. Heavy metals in municipal sewage sludge – a brief characteristic of potential threats and methods used to assess the ecological risk // *Environment, Earth and Ecology*. – 2021. – V. 5 (1). – P. 18–25. URL: <https://doi.org/10.24051/eee/134276> (дата обращения 15.12.2022).
35. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1995. – V. 59. – P. 1217–1232. URL: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2) (дата обращения 15.12.2022).
36. Шабанов М.В., Стрекулев Г.Б. Геохимические процессы накопления тяжелых металлов в ландшафтах Южного Урала // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 184–192. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/1/3011> (дата обращения 15.12.2022).
37. Predictions of sediment toxicity using consensus-based freshwater sediment quality guidelines / C.G. Ingersoll, D.D. MacDonald, N. Wang, J.L. Crane, L.J. Field, P.S. Haverland, N.E. Kemple, R.A. Lindskoog, C. Severn, D.E. Smorong // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2001. – V. 41. – P. 8–21. URL: <https://doi.org/10.1007/s002440010216> (дата обращения 15.12.2022).
38. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems / D.D. MacDonald, C.G. Ingersoll, T.A. Berger // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2000. – V. 39. – P. 20–31. URL: <https://doi.org/10.1007/s002440010075> (дата обращения 15.12.2022).
39. Long E.R. Calculation and uses of mean sediment quality guideline quotients: a critical review // *Environmental Science & Technology*. – 2006. – V. 40. – № 6. – P. 1726–1736. URL: <https://doi.org/10.1021/es058012d> (дата обращения 15.12.2022).
40. ОСТ 41-05-263-86. Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1986. – 9 с.
41. Гусева Т.В. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды: справоч. материалы. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2007. – 192 с.
42. Yakameran E., Ari A., Aygün A. Land application of municipal sewage sludge: human health risk assessment of heavy metals // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – V. 319. – Article number 128568. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128568> (дата обращения 15.12.2022).
43. The concentration of trace elements in sewage sludge from wastewater treatment plant in Gniewino / J. Milik, R. Pasela, M. Lachowicz, M. Chalamoński // *Journal of Ecological Engineering*. – 2017. – V. 18. – Is.5. – P. 118–124. URL:

- <https://doi.org/10.12911/22998993/74628> (дата обращения 15.12.2022).
44. Sewage sludge quality and management for circular economy opportunities in Lombardy / M. Domini, G. Bertanza, R. Vahidzadeh, R. Pedrazzani // *Applied Sciences*. – 2022. – V. 12 (20). – Article number 10391. URL: <https://doi.org/10.3390/app122010391> (дата обращения 15.12.2022).
  45. Nationwide review of heavy metals in municipal sludge wastewater treatment plants in China: Sources, composition, accumulation and risk assessment / X. Cheng, C. Wei, X. Ke, J. Pan, G. Wei, Y. Chen, C. Wei, F. Li, S. Preis // *Journal of Hazardous Materials*. – 2022. – V. 437. – Article number 129267. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129267> (дата обращения 15.12.2022).
  46. Hydrogeochemistry and heavy metal contamination in groundwaters of Dhaka metropolitan city, Bangladesh: assessment of human health impact / S. Sharmin, J. Mia, M.S. Miah, H.M. Zakir // *Hydro Research*. – 2020. – V. 3. – P. 106–107. URL: <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2020.10.003> (дата обращения 15.12.2022).
  47. Перевошиков Р.Д. Естественные радионуклиды (<sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th) в депонирующих средах (территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 3. – С. 29–38. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/3/3599> (дата обращения 15.12.2022).
  48. UNSCEAR. Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report to the General Assembly, with annexes. – New York, United Nations Publ., 2000. – 659 p.
  49. Обработка осадков городских сточных вод / Л.Р. Хисамеева, А.С. Селюгин, Р.Н. Абитов, А.В. Бусарев, Н.С. Урмитова. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. – 105 с. URL: <https://www.kg.asu.ru/upload/iblock/efc/obrabotka-osadkov-gorodskikh-stochnykh-vod.pdf> (дата обращения 10.11.2022).
  50. В Санкт-Петербурге для утилизации осадка сточных вод применяются инновационные технологии. Сайт Администрации Санкт-Петербурга. – 2016. URL: <https://www.gov.spb.ru/gov/otas/ingen/news/92909/> (дата обращения 11.11.2022).
  51. Представители Водоканала обсудили стандарты обработки и утилизации осадка сточных вод со специалистами из Германии. Сайт ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга». – 2021. URL: [http://www.vodokanal.spb.ru/presscentr/news/predstaviteli\\_vodokanala\\_obsudili\\_standarty\\_obrabotki\\_i\\_utilizacii\\_osadka\\_stochnykh\\_vod\\_so\\_specialistami\\_iz\\_germanii/](http://www.vodokanal.spb.ru/presscentr/news/predstaviteli_vodokanala_obsudili_standarty_obrabotki_i_utilizacii_osadka_stochnykh_vod_so_specialistami_iz_germanii/) (дата обращения 11.11.2022).
  52. EPA Basic Information about Biosolids. URL: <https://www.epa.gov/biosolids/basic-information-about-biosolids> (дата обращения 12.07.2022).
  53. Vaithyanathan V.K., Cabana H. Integrated biotechnology management of biosolids: sustainable ways to produce value-added products // *Frontiers in Water*. – 2021. – V. 3. – Article number 729679. URL: <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.729679> (дата обращения 15.12.2022).
  54. Eurostat. Sewage sludge production and disposal from urban wastewater. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/environment/water> (дата обращения 06.09.2022).
  55. Legislation for the reuse of biosolids on agricultural land in Europe: overview / M.C. Collivignarelli, A. Abbà, A. Frattarola, M. Carnevale Miino, S. Padovani, I. Katsoyannis, V. Torretta // *Sustainability*. – 2019. – V. 11 (21). – Article number 6015. URL: <https://doi.org/10.3390/su11216015> (дата обращения 15.12.2022).
  56. Zabielska-Adamska K. Bottom ash characteristics and potential application in road embankment // *Sustainability*. – 2020. – V. 12 (1). – Article number 39. URL: <https://doi.org/10.3390/su12010039> (дата обращения 15.12.2022).
  57. Development, current state and future trends of sludge management in China: based on exploratory data and CO<sub>2</sub>-equivalent emissions analysis / L. Wei, F. Zhu, Q. Li, C. Xue, X. Xia, H. Yu, Q. Zhao, J. Jiang, S. Bai // *Environment International*. – 2020. – V. 144. – Article number 106093. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106093> (дата обращения 15.12.2022).
  58. Tang C.-W., Cheng C.-K. Sustainable use of sludge from industrial park wastewater treatment plants in manufacturing lightweight aggregates // *Materials*. – 2022. – V. 15 (5). – Article number 1785. URL: <https://doi.org/10.3390/ma15051785> (дата обращения 15.12.2022).
  59. Characterization, spatial variation and management strategy of sewer sediments collected from combined sewer system: a case study in Longgang District, Shenzhen / Y. Luo, S. Bao, S. Yang, Y. Zhang, Y. Ping, C. Lin, P. Yang // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2021. – V. 18 (14). – Article number 7687. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph18147687> (дата обращения 15.12.2022).
  60. Rosiek K. Directions and challenges in the management of municipal sewage sludge in Poland in the context of the circular economy // *Sustainability*. – 2020. – V. 12 (9). – Article number 3686. URL: <https://doi.org/10.3390/su12093686> (дата обращения 15.12.2022).
  61. Duan B., Feng Q. Risk assessment and potential analysis of the agricultural use of sewage sludge in Central Shanxi Province // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2022. – V. 19 (7). – Article number 4236. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph19074236> (дата обращения 15.12.2022).
  62. Comprehensive evaluation of the control efficiency of heavy-metal emissions during two-step thermal treatment of sewage sludge / Y. Li, Z. Fang, W. Teng, S. Shen, R. Li // *ACS Omega*. – 2020. – V. 38 (5). – P. 24467–24476. URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02939> (дата обращения 15.12.2022).
  63. Сидорова И.Т. Становление химической промышленности в Верхнекамье на примере Березниковского химического комбината // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: История и политические науки*. – 2010. – Т. 2. – С. 80–83. URL: <https://www.istpolitmgu.ru/jour/article/view/1165> (дата обращения 15.11.2022).
  64. Блинов С.М., Меньшикова Е.А. Использование отходов предприятий Пермского края // *Вестник Пермского университета. Геология*. – 2019. – Т. 18 – № 2. – С. 179–181. URL: <https://doi.org/10.17072/psu.geol.18.2.179> (дата обращения 15.12.2022).

Поступила: 23.12.2022 г.

Прошла рецензирование: 03.03.2023 г.

#### Информация об авторах

**Ушакова Е.С.**, младший научный сотрудник Естественнонаучного института Пермского государственного национального исследовательского университета.

**Белкин П.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Естественнонаучного института Пермского государственного национального исследовательского университета.

**Дробинина Е.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры динамической геологии и гидрогеологии Пермского государственного национального исследовательского университета.

UDC 504.064

## SEWAGE SLUDGE FORMATION CHARACTERISTICS AND ENVIRONMENTAL STATUS OF THE INDUSTRIAL WASTEWATER CHANNEL

Evgeniya S. Ushakova<sup>1</sup>,  
ushakova.evgeniya@gmail.com

Pavel A. Belkin<sup>1</sup>,  
pashabelkin@mail.ru

Elena V. Drobinina<sup>1</sup>,  
alenadrobinina@yandex.ru

<sup>1</sup> Perm State University,  
15, Bukirev street, Perm, 614068, Russia.

**The relevance** of the research is determined by the need to obtain baseline data for the safe handling of sewage sludge produced resulting the sedimentation of the suspended solids from wastewater of industrial channel.

**The main aim** of the research is to characterize the chemistry of wastewater and sewage sludge in an industrial channel, and to determine the environmental status and possible options for handling sewage sludge.

**The object** of the study is the industrial channel or sewage transport channel of the city Berezniki (Perm Krai, Russia). This channel is an artificial waterway with a total length of 8,9 km. It was formed in the middle of the last century with the aim of protecting the industrial area of the city Berezniki from waterlogging and the organization of unified urban industrial canalization. At present, the channel accepts industrial wastewater from a number of plants, as well as wastewater from the city treatment facilities and storm water runoff. A treatment plant operates at the mouth of the channel, after which the treated water enters the Kama reservoir.

**The research methods** included determination of major ions and trace element of wastewater and sewage sludge of industrial channel using capillary electrophoresis together with inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Additionally, microbiological and radiological parameters of the sewage sludge were determined using the methods established by the environmental legislation of the Russian Federation. In this study the contamination degree of wastewater and sewage sludge was assessed using quality guidelines, geochemical and environmental indices. To understand environmental status and geochemical assessment of sewage sludge of the industrial channel the major ions and trace element contamination of the samples were assessed based on potential ecological risk index, geoaccumulation index, sediment quality coefficient.

**Results.** The sewage sludge samples are characterized by a moderate content of toxic elements, are safe in terms of radiation and show no signs of bacterial contamination. However, the contamination degree of sewage sludge increases significantly to the lower part of the industrial channel. Sewage sludge in the lower part of the industrial channel (in before treatment plant) is significantly enriched in all studied trace elements in comparison with the upper continental crust. It was found that the degree of contamination by  $I_{geo}$  in the industrial channel ranged from heavily contaminated to extremely contaminated. The highest values of the index of geoaccumulation ( $I_{geo} > 1000$ ) were found in the lower part of the industrial channel. The values of the index of potential ecological risk in the industrial channel changed from low to moderate. The average value of the sludge quality factor shown highly contamination of sludge in the downstream, while in the middle stream the sewage sludge belongs to uncontaminated. A comparative analysis of international standards for acceptable limits of heavy metals in sewage sludge for agricultural use was carried out. The possible uses of sewage sludge accumulated in the industrial channel in the city of Berezniki were assessed. The presence of extremely high concentrations of chlorides and trace elements in sewage sludge limits its recycling. This determines the need to further search for environmentally disposal and recycling routes for the accumulated sewage sludge. The most promising trend of recycling the accumulated sludge from the Berezniki industrial channel may be the development of technologies for the production of construction materials.

### Key words:

wastewater, sewage sludge, toxic trace elements, chloride pollution, industrial channel, Verkhnekamskoe deposit.

The research was supported by the grant no. MK-4377.2022.1.5 from the President of the Russian Federation. The authors are grateful to the Nanomineralogy Sector of the Center for Collective Use of the Perm State University for conducting laboratory analytical studies.

### REFERENCES

- Zhao Y., Zhuang X., Ahmad S., Sung S., Ni S.-Q. Biotreatment of high-salinity wastewater: current methods and future directions. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2020, vol. 36, article number 3737. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02815-4> (accessed 15 December 2022).
- AlJaberi F.Y., Ahmed S.A., Makki H.F. Electrocoagulation treatment of high saline oily wastewater: evaluation and optimization. *Heliyon*, 2020, vol. 6, Iss. 6, article number e03988. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03988> (accessed 15 December 2022).
- Ching Y.C., Redzwan G. Biological treatment of fish processing saline wastewater for reuse as liquid fertilizer. *Sustainability*, 2017, vol. 9 (7), article number 1062. Available at: <https://doi.org/10.3390/su9071062> (accessed 15 December 2022).
- Gotub A., Piekutin J. Pollution of sedimentary ponds at an industrial plant in Janikowo (Poland). *Water*, 2020, vol. 12 (2), article number 536. Available at: <https://doi.org/10.3390/w12020536> (accessed 15 December 2022).
- Wu D., Hu Y., Liu Y., Zhang R. Review of chloride ion detection technology in water. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11 (23), article number 11137. Available at: <https://doi.org/10.3390/app112311137> (accessed 15 December 2022).
- Ekologicheskaya bezopasnost osvoeniya mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh* [Environmental safety of mineral deposit development]. Ed. by E.A. Khayrulina. Perm, Perm State University Publ., 2022. 175 p.

7. Bäche J., Coring E. Biological effects of anthropogenic salt-load on the aquatic fauna: a synthesis of 17 years of biological survey on the rivers Werra and Weser. *Limnologica*, 2011, vol. 41 (2), pp. 125–133. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.limno.2010.07.005> (accessed 15 December 2022).
8. Cañedo-Argüelles M., Kefford B.J., Piscart C., Prat N., Schäfer R.B., Schulz C.J. Salinisation of rivers: an urgent ecological issue. *Environmental Pollution*, 2013, vol. 173, pp. 157–167. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.10.011> (accessed 15 December 2022).
9. Braukmann U., Böhme D. Salt pollution of the middle and lower sections of the river Werra (Germany) and its impact on benthic macroinvertebrates. *Limnologica*, 2011, vol. 41, pp. 113–124. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.limno.2010.09.003> (accessed 15 December 2022).
10. Schulz C.J., Cañedo-Argüelles M. Lost in translation: the German literature on freshwater salinization. *Philosophical Transactions the Royal Society B*, 2019, vol. 374, article number 20180007. Available at: <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0007> (accessed 15 December 2022).
11. Kudryashov A.I. *Verkhnekamskoe mestorozhdenie soley* [Verkhnekamskoe salt deposit]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Epsilon Plyus Publ., 2013. 386 p.
12. Krasilnikova S., Blinov S., Krasilnikov P., Belkin P. World experience using of soda production waste. *Ecology and Industry of Russia*, 2021, vol. 25, no. 12, pp. 48–53. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-12-48-53> (accessed 15 December 2022).
13. Lepikhin A.P., Miroshnichenko S.A. Tekhnogennoe vozdeystvie Solikamsko-Bereznikovskogo promuzla na poverkhnostnye vodnye obyekty [Technogenic impact of the Solikamsko-Berezniki industrial hub on surface waters]. *Gornyi Zhurnal*, 2008, no. 10, pp. 92–96.
14. Ushakova E.S., Belkin P.A., Baklanov M.A., Drobinina E.V., Puzik A.Yu. Ecological-geochemical and bioindication assessment of the small rivers pollution at the city of Berezniki. *Bulletin of Perm University. Geology*, 2022, vol. 21, no. 4, pp. 384–393. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.17072/psu.geol.21.4.375> (accessed 15 December 2022).
15. Schellenberg T., Subramanian V., Ganeshan G., Tompkins D., Pradeep R. Wastewater discharge standards in the evolving context of urban sustainability – the case of India. *Frontiers in Environmental Science*, 2020, vol. 8, article number 30. Available at: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00030> (accessed 15 December 2022).
16. Zhdanov A.F. *Berezniki – gorod uralskikh khimikov* [Berezniki – city of Ural chemists]. Molotov, Molotov Publ. house, 1956. Available at: <https://libking.ru/books/sci-/s-ci-history/1146465-aleksandr-zhdanov-berezniki-gorod-uralskih-himikov.html> (accessed 15 November 2022).
17. *Pravila ispolzovaniya vodnykh resursov Kamskogo i Votkinskogo vodokhranilishch na r. Kama* [Rules for the use of water resources of the Kama and Votkinsk reservoirs on the Kama river]. Federal Agency for Water Resources dated November 7, 2016 No. 255.
18. Penskiy A.V., Kumosenko V.V., Kasparov S.A. *Sposob ochistki stochnykh vod titano-magniyevogo proizvodstva* [Method of treatment of sewage waters of titanium-magnesium production]. Patent RF, no. 2141456, 1998.
19. Krepysheva I.V., Rudakova L.V., Kozlov S.G. Physicochemical and toxicological properties of slime at soda ash production. *MIAB*, 2015, no. 1, pp. 335–342. In Rus.
20. ITS 8-2015. *Ochistka stochnykh vod pri proizvodstve produktii (tovarov), vypolnenii rabot i okazanii uslug na krupnykh predpriyatiyakh* [Information and Technical Handbook on Best Available Technology ITS 8-2015. Wastewater treatment in manufacture of products (goods), performance of works and provision of services in large enterprises]. Moscow, Buro NDT Publ., 2015. 129 p.
21. ITS 2-2019. *Proizvodstvo ammiaka, mineralnykh udobreniy i neorganicheskikh kislot* [Information and Technical Handbook on Best Available Technology ITS 2-2019. Manufacture of ammonia, fertilizers and inorganic acids]. Moscow, Buro NDT Publ., 2019. 836 p.
22. Kulenova N.A., Akhmetvaliev A.Z.M., Mamyachenkov S.V., Anisimova O.S. Disposal of titanium-magnesium production industrial effluents. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*, 2019, no. 1, pp. 25–33. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2019-1-25-33> (accessed 15 December 2022).
23. Meshalkin V.P., Aristov V.M., Shulaev N.S., Bykovskiy N.A. Physicochemical foundations of an energy and resource efficient combined technology for processing of soda ash production wastewater. *Doklady Chemistry*, 2020, vol. 494, no. 1, pp. 145–148. Available at: <https://doi.org/10.31857/S268695352005009X> (accessed 15 December 2022).
24. Myagkaya I.N., Saryg-ool B.Yu., Kirichenko I.S., Gustaitis M.A., Lazareva E.V. Ecogeochemical characteristics of the Yarly-Amry and the Chibitka rivers, located in the dispersion train of Aktash mercury deposit and its wastes (Gorny Altai). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 4, pp. 7–26. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3273> (accessed 15 December 2022).
25. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach. *Water Research*, 1980, vol. 14, Iss. 8, pp. 975–1001. Available at: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8) (accessed 15 December 2022).
26. Ushakova E.S., Karavaeva T.I., Belkin P.A. Ecological condition of soils in industrial areas (as in the case of Berezniki, Perm region): comparison of Russian and foreign methods of assessment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 58–70. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3273> (accessed 15 December 2022).
27. Wang N., Wang A., Kong L., He M. Calculation and application of Sb toxicity coefficient for potential ecological risk assessment. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 610–611, pp. 167–174. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.268> (accessed 15 December 2022).
28. Jeong H., Ra K. Investigations of metal pollution in road dust of steel industrial area and application of magnetic separation. *Sustainability*, 2022, vol. 14, article number 919. Available at: <https://doi.org/10.3390/su14020919> (accessed 15 December 2022).
29. Ushakova E., Menshikova E., Blinov S., Vaganov S., Perevoshchikov R. Distribution of trace elements, rare earth elements and ecotoxicity in sediments of the Kosva Bay, Perm Region (Russia). *Journal of Ecological Engineering*, 2022, vol. 23, no. 4, pp. 1–16. Available at: <https://doi.org/10.12911/22998993/146269> (accessed 15 December 2022).
30. Moskovchenko D., Pozhitkov R., Soromotin A., Tyurin V. The Content and Sources of Potentially Toxic Elements in the Road Dust of Surgut (Russia). *Atmosphere*, 2022, vol. 13 (1), article number 30. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos13010030> (accessed 15 December 2022).
31. Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river. *GeoJournal*, 1969, vol. 2, pp. 108–118.
32. Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N., Reshetnyak O.S., Gibkov E.V. River bottom sediments of technogenic disturbed geosystems of the Eastern Donbas: comparative assessment of pollution level with heavy metals by Russian and international criteria. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2021, vol. 85, no. 4, pp. 554–564. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.31857/S2587556621040130> (accessed 15 December 2022).
33. Kowalik R., Gawdzik J., Bak-Patyna P., Ramiaczek P., Jurišević N. Risk analysis of heavy metals migration from sewage sludge of wastewater treatment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, vol. 19 (18), article number 11829. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph191811829> (accessed 15 December 2022).
34. Tytla M., Widziejewicz-Rzońca K. Heavy metals in municipal sewage sludge – a brief characteristic of potential threats and methods used to assess the ecological risk. *Environment, Earth and Ecology*, 2021, vol. 5 (1), pp. 18–25. Available at: <https://doi.org/10.24051/ee/134276> (accessed 15 December 2022).
35. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 1995, vol. 59, pp. 1217–1232. Available at: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2) (accessed 15 December 2022).
36. Shabanov M.V., Strekulev G.B. Geochemical processes of accumulation of heavy metals in the landscapes of the Southern Urals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 184–192. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3273> (accessed 15 December 2022).
37. Ingersoll C.G., MacDonald D.D., Wang N., Crane J.L., Field L.J., Haverland P.S., Kemble N.E., Lindskoog R.A., Severn C.,

- Smorong D.E. Predictions of sediment toxicity using consensus-based fresh water sediment quality guidelines. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, vol. 41, pp. 8–21. Available at: <https://doi.org/10.1007/s002440010216> (accessed 15 December 2022).
38. MacDonald D.D., Ingersoll C.G., Berger T.A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, vol. 39, pp. 20–31. Available at: <https://doi.org/10.1007/s002440010075> (accessed 15 December 2022).
  39. Long E.R. Calculation and uses of mean sediment quality guideline quotients: a critical review. *Environmental Science & Technology*, 2006, vol. 40, no. 6, pp. 1726–1736. Available at: <https://doi.org/10.1021/es058012d> (accessed 15 December 2022).
  40. OST 41-05-263-86. *Vody podzemnye. Klassifikatsiya po khimicheskomu sostavu i temperature* [Industry Standard 41-05-263-86. Underground waters. Classification by chemical composition and temperature]. Moscow, VSEGIN GEO Publ., 1986. 9 p.
  41. Guseva T.V. *Gidrokhimicheskie pokazateli sostoyaniya okruzhayushchey sredy: spravochnye materialy* [Hydrochemical indicators of the state of the environment: reference materials]. Moscow, FORUM: INFRA-M Publ., 2007. 192 p.
  42. Yakamercan E., Ari A., Aygün A. Land application of municipal sewage sludge: Human health risk assessment of heavy metals. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 319, article number 128568. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128568> (accessed 15 December 2022).
  43. Milik J., Pasela R., Lachowicz M., Chalamoński M. The concentration of trace elements in sewage sludge from wastewater treatment plant in Gniewino. *Journal of Ecological Engineering*, 2017, vol. 18, Iss. 5, pp. 118–124. Available at: <https://doi.org/10.12911/22998993/74628> (accessed 15 December 2022).
  44. Domini M., Bertanza G., Vahidzadeh R., Pedrazzani R. Sewage sludge quality and management for circular economy opportunities in Lombardy. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12 (20), article number 10391. Available at: <https://doi.org/10.3390/app122010391>
  45. Cheng X., Wei C., Ke X., Pan J., Wei G., Chen Y., Wei C., Li F., Preis S. Nationwide review of heavy metals in municipal sludge wastewater treatment plants in China: Sources, composition, accumulation and risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, vol. 437, article number 129267. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129267> (accessed 15 December 2022).
  46. Sharmin S., Mia J., Miah M.S., Zakir H.M. Hydrogeochemistry and heavy metal contamination in groundwaters of Dhaka metropolitan city, Bangladesh: assessment of human health impact. *HydroResearch*, 2020, vol. 3, pp. 106–107. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2020.10.003> (accessed 15 December 2022).
  47. Perevoshchikov R.D. Naturally occurring radionuclides (40k, 226ra, 232th) in the environment (Verkhnekamskoe deposit of potassium-magnesium salts). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 3, pp. 29–38. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/3/3599> (accessed 15 December 2022).
  48. UNSCEAR. *Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report to the General Assembly, with annexes*. New York, United Nations Publ., 2000. 659 p.
  49. Khisameyeva L.R., Selyugin A.S., Abitov R.N., Busarev A.V., Urmitova N.S. *Obrabotka osadkov gorodskikh stochnykh vod* [Treatment of urban sewage sludge]. Kazan, Kazan. State Architecture-building University Publ. house, 2016. 105 p. Available at: <https://www.kgasu.ru/upload/iblock/efc/obrabotka-osadkov-gorodskikh-stochnykh-vod.pdf> (accessed 10 November 2022).
  50. *V Sankt-Peterburge dlya utilizatsii osadka stochnykh vod primenyayutsya innovatsionnye tekhnologii* [St. Petersburg uses innovative technologies for sewage sludge disposal]. Available at: <https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/ingen/news/92909/> (accessed 11 November 2022).
  51. *Predstaviteli vodokanala obsudili standarty obrabotki i utilizatsii osadka stochnykh vod so spetsialistami iz Germanii* [Vodokanal representatives discussed sewage sludge treatment and disposal standards with specialists from Germany]. Available at: [http://www.vodokanal.spb.ru/presscentr/news/predstaviteli\\_vodokanala\\_obsudili\\_standarty\\_obrabotki\\_i\\_utilizatsii\\_osadka\\_stochnykh\\_vod\\_so\\_spetsialistami\\_iz\\_germanii/](http://www.vodokanal.spb.ru/presscentr/news/predstaviteli_vodokanala_obsudili_standarty_obrabotki_i_utilizatsii_osadka_stochnykh_vod_so_spetsialistami_iz_germanii/) (accessed 11 November 2022).
  52. *EPA Basic Information about Biosolids*. Available at: <https://www.epa.gov/biosolids/basic-information-about-biosolids> (accessed on 17 June 2022).
  53. Vaithyanathan V.K., Cabana H. Integrated biotechnology management of biosolids: sustainable ways to produce value – added products. *Frontiers in Water*, 2021, vol. 3, article number 729679. Available at: <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.729679> (accessed 15 December 2022).
  54. *Eurostat. Sewage sludge production and disposal from urban wastewater*. Available at: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/environment/water> (accessed on 6 September 2022).
  55. Collivignarelli M.C., Abbà A., Frattarola A., Carnevale Miino M., Padovani S., Katsoyiannis I., Torretta V. Legislation for the reuse of biosolids on agricultural land in Europe: overview. *Sustainability*, 2019, vol. 11 (21), article number 6015. Available at: <https://doi.org/10.3390/su11216015> (accessed 15 December 2022).
  56. Zabielska-Adamska K. Bottom ash characteristics and potential application in road embankment. *Sustainability*, 2020, vol. 12 (1), article number 39. Available at: <https://doi.org/10.3390/su12010039> (accessed 15 December 2022).
  57. Wei L., Zhu F., Li Q., Xue C., Xia X., Yu H., Zhao Q., Jiang J., Bai S. Development, current state and future trends of sludge management in China: based on exploratory data and CO<sub>2</sub>-equivalent emissions analysis. *Environment International*, 2020, vol. 144, article number 106093. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106093> (accessed 15 December 2022).
  58. Tang C.-W., Cheng C.-K. Sustainable use of sludge from industrial park wastewater treatment plants in manufacturing lightweight aggregates. *Materials*, 2022, vol. 15 (5), article number 1785. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma15051785> (accessed 15 December 2022).
  59. Luo Y., Bao S., Yang S., Zhang Y., Ping Y., Lin C., Yang P. Characterization, spatial variation and management strategy of sewer sediments collected from combined sewer system: a case study in Longgang District, Shenzhen. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, vol. 18 (14), article number 7687. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph18147687> (accessed 15 December 2022).
  60. Rosiek K. Directions and challenges in the management of municipal sewage sludge in Poland in the context of the circular economy. *Sustainability*, 2020, vol. 12 (9), article number 3686. Available at: <https://doi.org/10.3390/su12093686> (accessed 15 December 2022).
  61. Duan B., Feng Q. Risk assessment and potential analysis of the agricultural use of sewage sludge in Central Shanxi Province. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, vol. 19 (7), article number 4236. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph19074236> (accessed 15 December 2022).
  62. Li Y., Fang Z., Teng W., Shen S., Li R. Comprehensive evaluation of the control efficiency of heavy-metal emissions during two-step thermal treatment of sewage sludge. *ACS Omega*, 2020, vol. 38 (5), pp. 24467–24476. Available at: <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02939> (accessed 15 December 2022).
  63. Sidorova I.T. Formation of chemical industry in Verkhnekamye by the example of Berezniķiķechemical plants. *Bulletin of Moscow Region State University. Series: History and Political Sciences*, 2010, vol. 2, pp. 80–83. In Rus. Available at: <https://www.istpolitmgou.ru/jour/article/view/1165> (accessed on 15 November 2022)
  64. Blinov S.M., Menshikova E.A. Utilisation the industrial wastes in Perm region. *Bulletin of Perm University. Geology*, 2019, vol. 18, no. 2, pp. 179–191. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.17072/psu.geol.18.2.179> (accessed 15 December 2022).

Received: 23 December 2022.

Reviewed: 3 March 2023.

#### Information about the authors

**Evgeniya S. Ushakova**, junior researcher, Perm State University.

**Pavel A. Belkin**, Cand. Sc., researcher, Perm State University.

**Elena V. Drobinina**, Cand. Sc., associate professor, Perm State University.