



Научная статья

Гидрогеоэкологические условия техногенных подземных вод в объектах размещения отходов

А.И.СЕМЯЧКОВ, В.А.ПОЧЕЧУН ✉, К.А.СЕМЯЧКОВ

Институт экономики Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

Как цитировать эту статью: Семячков А.И., Почечун В.А., Семячков К.А. Гидрогеоэкологические условия техногенных подземных вод в объектах размещения отходов // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 168-179. DOI: [10.31897/PMI.2023.24](https://doi.org/10.31897/PMI.2023.24)

Аннотация. Рассмотрены специфические гидрогеоэкологические условия водоносных горизонтов некоторых техногенных образований в основном железорудных скарново-магнетитовой и титано-магнетитовой формаций. Образующиеся отходы, которые складываются в объектах размещения отходов в процессе отработки месторождений, вследствие воздействия ряда факторов (природных и техногенных) формируют техногенные воды. Объекты размещения отходов – сложные инженерные сооружения (отвалы и шламохранилища), которые в свою очередь создают свои гидрогеоэкологические условия, которые необходимо исследовать в целях предотвращения и минимизации эколого-экономического ущерба, наносимого водной среде данными объектами. В работе представлены долговременные полевые и лабораторные исследования водной среды, находящейся под воздействием объекта размещения отходов на Среднем Урале – одного из крупнейших хвостохранилищ, представляющего потенциальную экологическую и техногенную опасность. Данное хвостохранилище содержит десятки тонн отходов – хвостов обогащения и создает специфические гидрогеоэкологические условия на территории. На основе многолетних мониторинговых исследований проведен анализ данных условий – оценено качество подземных вод, находящихся под воздействием хвостохранилища. Показано, что подземные воды имеют техногенный характер, т.е. являются техногенными водами, которые оказывают существенное воздействие на поверхностную и подземную гидросферы территории.

Ключевые слова: гидрогеоэкологические условия; объекты размещения отходов; отвалы и хвостохранилища; подземные воды; поверхностные воды

Поступила: 30.09.2022

Принята: 13.02.2023

Онлайн: 13.03.2023

Опубликована: 25.04.2023

Введение. При отработке месторождений образуются отходы, которые необходимо складировать в объекты размещения отходов (ОРО), представляющие собой технически сложные сооружения. Их можно разделить на объекты «сухого» складирования (различные отвалы) и объекты «мокрого» складирования (хвостохранилища). В результате воздействия природных и техногенных процессов (выпадения атмосферных осадков, конденсации, сброса технической воды) в ОРО формируются подземные воды в виде техногенных водоносных горизонтов.

Целью исследования является изучение условий формирования и разгрузки подземных вод в ОРО. При этом необходимо оценить факторы формирования объема и качество подземных вод в ОРО, а также их воздействие на поверхностную и подземную гидросферу.

Исследования проведены на Среднем Урале, где размещено более 10 млрд т отходов. ОРО помещены в специфические гидрологические и гидрогеологические условия в открытой структуре горно-складчатого Урала и в свою очередь создают специфические гидрогеоэкологические условия. Все это определяет необходимость изучения гидрогеоэкологических условий объектов размещения отходов, воздействие которых на водную среду нередко оценивается как катастрофическое [1-3].

Методы. В работе использованы гидрогеоэкологический анализ, геохимический и ретроспективный методы. Работа основана на большом количестве полевых наблюдений, которые авторы ведут на протяжении более 20 лет на объектах размещения отходов от предприятий горно-промышленного комплекса Среднего Урала. В работе проанализированы результаты собственных



мониторинговых исследований компонентов окружающей среды – поверхностных и подземных вод, а также фоновые материалы.

В качестве примера исследовалось шламохранилище Качканарского ГОКа, химический состав его отходов, мг/дм³: Sc – 0,013; TiO₂ – 0,7; Y – 0,01; CaO – 19,2; ZnO₂ – 0,1; SiO₂ – 47,5; Fe – 6,3; MgO – 13,4. Для контроля качества подземных вод в районе воздействия хвостохранилища создана режимная сеть наблюдательных скважин, включающая 12 однотипных скважин, которые расположены на первом от поверхности водоносном горизонте подземных вод. Глубина скважин составила 21-47 м, диаметр 112-132 мм, с обсадкой трубами 127 мм верхней зоны глинисто-дресвяных образований и изоляцией затрубного пространства от попадания поверхностных талых и дождевых вод во вскрываемый водоносный горизонт трещинно-поровых подземных вод для предотвращения искажения результатов гидрохимического опробования подземных вод. Скважины расположены у подножья дамб шламохранилища за пределами выпусков фильтрата шламовой воды.

Основные принципы размещения скважин относительно границ хвостохранилища – доступность подхода к местам заложения, равномерность распределения по периметру хвостохранилища и соответствие направлению движения потоков подземных вод.

Воздействие выпусков с хвостохранилища на подземную гидросферу отражают три скважины. Пробы подземных и поверхностных вод отбирались ежеквартально по установленным методикам, анализировались в аккредитованных химических лабораториях. Всего было проанализировано более 200 проб.

Обсуждение результатов. Горно-складчатый Урал (Свердловская, Челябинская, Оренбургская области и Башкирия) отнесен к бассейну грунтовых вод зон трещиноватости в породах среднего и нижнего палеозоя [4-6]. Геологическое строение бассейна исключительно сложное. Длительное континентальное развитие привело к образованию относительно низкогогорного рельефа с сохранившейся корой выветривания, выполняющей двоякую роль. Во-первых, остаточная кора замедляет инфильтрацию атмосферных осадков; во-вторых, способствует выравниванию инфильтрации. На участках развития глинистых кор отмечается кольматация трещин зоны выветривания. Поэтому большое значение придается линейным зонам повышенной трещиноватости, образовавшимся в постгерцинское и особенно в новейшее время.

С окончанием герцинской эпохи складчатости геологическое развитие региона не прекратилось, оно продолжилось в виде физического, химического выветривания и сводово-глыбовых поднятий с эрозионными процессами. В результате этого образовалась закономерная по вертикали система трещин различной интенсивности, формирующая зоны трещиноватости. Зоны образовались в разное время, но основой для возникновения каждой последующей, согласно принципу унаследованного развития, служила предыдущая. Хотя фильтрационные и емкостные свойства, химический состав вод, скорости движения и разгрузки зон трещиноватости различаются, они образуют один водоносный горизонт.

Таким образом можно выделить две таксономические единицы или два водоносных комплекса. Один из комплексов сложен рыхлыми мезозойскими и кайнозойскими отложениями, а второй является единым водоносным комплексом зон трещиноватости пород от кембрия до девона (рис.1).

Мезозойские и кайнозойские образования аллювиального, элювиально-делювиального и техногенного генезиса содержат поровые воды. Все они формируют отдельные водоносные горизонты, которые различаются фильтрационными и емкостными свойствами, мощностью, составом отложений и условиями залегания.

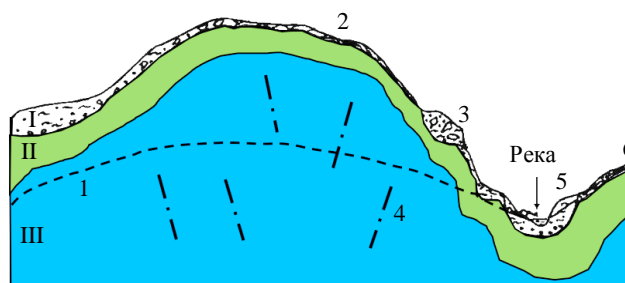


Рис.1. Схема размещения подземных вод в гидрогеологических массивах Урала

Водоносные комплексы: I – рыхлые мезозойские и кайнозойские отложения; II – зоны региональной трещиноватости; III – зоны тектонических нарушений

1 – уровень подземных вод; 2 – зона аэрации и сезонных колебаний уровня подземных вод; 3 – подземные воды ОРО; 4 – тектонические нарушения; 5 – грунтовые воды аллювиальных отложений



Водоносный горизонт ОРО сформировался в связи с освоением многочисленных месторождений твердых полезных ископаемых Урала, неизбежно сопровождаемым выемкой из недр руд и пустых пород, складированных в отвалы. Их дополняют шламы обогатительных фабрик и золы ТЭЦ, хвосты драг в долинах рек. Отвалы и шламохранилища имеют локальное распространение, но играют значительную роль в изменении природной обстановки в районе рудников, формируя техногенный ландшафт. Большие объемы и площади отвалов способствуют аккумуляции атмосферных осадков, талых снеговых вод, конденсации паров из воздуха [7-9].

Оценка факторов формирования объема подземных вод ОРО. Различаются сухие (например, отвалы забалансовых руд) и мокрые (хвосты- и шламохранилища) виды складирования отходов [10-12]. При сухом складировании техногенные воды формируются в основном под воздействием атмосферных осадков. При мокром складировании главную роль в период эксплуатации объекта играют производственные воды, а после прекращения его эксплуатации – атмосферные осадки [13-15]. Можно выделить три наиболее характерных варианта расположения ОРО на рельефе [16-18]:

- на водоразделе – при сухом складировании техногенные воды формируются только под воздействием атмосферных осадков, а при мокром – производственных вод (Салдинское шламохранилище);
- на склоне – в формировании химического состава техногенных вод участвует плоскостной сток, затекающий по рельефу в отвал (Тонский отвал ВГОК);
- в русловой части временных или постоянных водотоков в формировании техногенных вод участвуют поверхностные воды (Черемшанское шламохранилище, отвал мартеновских шлаков ОАО «НТМК»).

Важнейшими гидрометеорологическими факторами являются количество выпадающих атмосферных осадков, их средняя интенсивность, продолжительность, химический состав и pH. Морфометрические параметры ОРО могут оказывать большое влияние на расход подземных вод. Так, при сухом складировании определяющим фактором является мощность ОРО – чем она больше, тем продолжительнее контакт атмосферных вод с отвалом и тем выше объем подземных вод. При этом значимыми характеристиками могут быть длина и ширина ОРО [19].

На Гороблагодатском месторождении подземные воды техногенных отложений имеют широкое площадное развитие вокруг действующих шахт и карьера рудника. Определенную роль в изменении природной обстановки района месторождения играют отвалы пустых пород и шламохранилища, занимающие огромные площади (отвал 6 – 1120000 м², отвалы 13, 14, 15 – 2250000 м², Половинкинское шламохранилище – 2,3 млн м²). Большие площади отвалов и их высота способствуют аккумуляции жидких атмосферных осадков, талых снеговых вод, конденсации влаги воздуха и постепенному их расходованию, которое проявляется в виде мочагин, постоянно и временно действующих источников, в подпитывании небольших водоемов.

Инфильтрация атмосферных осадков, снеготаяние, подпитывание за счет поверхностного стока, конденсация влаги воздуха ведет к накоплению вод под отвалом № 6 и внезапному прорыву их на поверхность. Непосредственно в районе прорыва водосборная площадь отвала № 6 составляет 524 тыс. м², объем 17,5 млн м³. В зависимости от количества атмосферных осадков и конденсации влаги воздуха прорывы могут происходить как ежегодно, так и с перерывом до двух лет. Прорывы в летнее время (начиная со второй половины лета) характеризуются внезапностью, и в случае их ежегодных проявлений дебит доходит до 60-70 м³/ч, продолжительность излива 15-20 сут. Общие запасы изливающих за это время вод составляют 21-25 тыс. м³. В случаях накопления вод в течение двух лет прорывы также происходят внезапно, но дебит существенно увеличивается, составляя примерно 300 м³/ч при общей продолжительности излива до 95 сут.

В зимнее время поступление вод происходит в начальный момент медленно с образованием наледи, которая по мере роста продвигается в сторону поселка Благодать. Постепенное продвижение вод приводит к затоплению подвалов домов, наледью перекрывается дорога на дробильно-обогатительную фабрику № 3. Высота наледи достигает 0,5-3,0 м, площадь примерно 70 тыс. м². Только с увеличением дебита прорыва вода прокладывает себе путь, и по канаве происходит сравнительно быстрая разгрузка накопившихся под отвалом вод. Общий объем вод при условии накопления несколько лет значительный – до 500-600 тыс. м³ (рис.2).

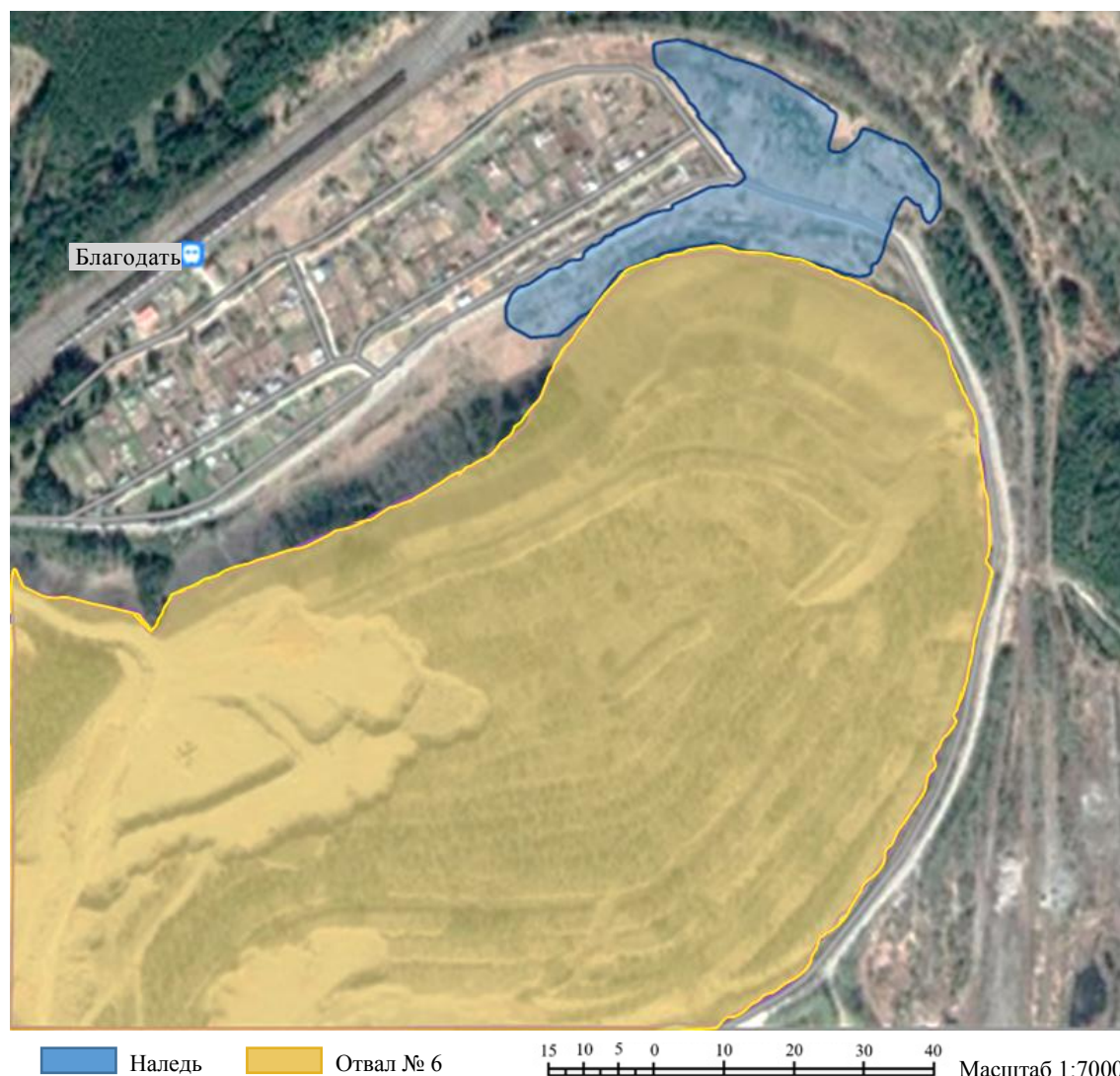


Рис.2. Схема расположения наледи от подземных вод из ОРО на Гороблагодатском месторождении

Накопление большой массы воды и внезапный прорыв объясняются тем, что отвал сложен неоднородными по размеру частицами – глиной, древесиной, щебнем и глыбами. Холодный воздух зимой, теплый – летом проветривает отвал, неся по сезону тепло или холод. Зимой в краевых частях отвал промораживается, внутренние части в силу большой мощности остаются непромороженными. Конденсация влаги воздуха происходит и в теплый, и в холодный периоды с образованием каменно-ледяной линзы на границе талой и мерзлой частей отвала. Накопление вод происходит как в форме льда, так и в жидком виде. Удерживается она как плотиной, каменно-ледяной линзой, а в краевых ее частях – прослоями глин, создающих условия для накопления. С накоплением вод до критического уровня происходит протаивание линзы и внезапный прорыв, обычно в ноябре-декабре. Прорывы происходят постоянно на протяжении 50 лет.

На Естюнинском месторождении постоянный родник зафиксирован у подножия северного отвала. В то же время существовала скрытая разгрузка вод техногенных отложений в подземные выработки, которая стала явной после возникновения оползневого цирка на участке обрушения пород. Отвалы располагаются на поверхности относительно ровных участков местности, примыкают к склонам гор и находятся всегда выше уровня грунтовых вод. Мощность и площади подстилающих глинистых отложений таковы, что позволяют удерживать воду круглый год, поэтому такие водоносные горизонты можно считать постоянно действующими.

Шламохранилища занимают пониженные участки рельефа, например, в долинах рек, в отработанных карьерах, где кроме воды, участвующей в транспортировке шламов, происходит подпитка грунтовыми водами [20-23]. Подобные водоносные горизонты сформировались на Гусевогорском



месторождении титаномagnetитов (хвостохранилище), на Черемшанском шламоохранилище Высокогорского месторождения, на Половинкинском и Салдинском шламоохранилищах Гороблагодатского рудного поля. Под шламоохранилищами произошло поднятие уровня подземных вод на 15-20 м с образованием куполов растекания, в основании плотин сформировались родники.

Геолого-технический разрез по скважине наблюдательной сети: техногенные отложения tQ (глубина залегания 0-3 м, мощность слоя 3 м); суглинок делювиальный Q (глубина залегания 3-3,9 м, мощность слоя 0,9 м); суглинок элювиальный светло-желтый плотный Q (глубина залегания 3,9-8 м, мощность слоя 4,1 м); габбро S_1I_{1-2} (глубина залегания 8-27 м, мощность слоя 19 м); диаметр бурения 127-132 мм, глубина обсадки 110 мм; глубина бурения 6,7 м; уровень воды – появление 12 м, установившийся 12 м.

Оценка формирования качества подземных вод в ОРО. Формирование состава подземных вод при их взаимодействии с твердыми фазами ОРО происходит в результате выщелачивания [24] – избирательного растворения жидкостью одного или нескольких компонентов твердой фазы. Растворение происходит до тех пор, пока химические потенциалы растворяющегося компонента в жидкой и твердой фазах не сравниваются. Достижимая при этом предельная концентрация компонента C_n соответствует состоянию насыщенного раствора и называется растворимостью, величина которой зависит от многих факторов. Поэтому при изучении закономерностей взаимодействия в системе вода – порода большое значение имеют методы натурального моделирования.

Для прогнозирования выноса компонентов из твердой фазы ОРО в жидкую необходимо определить следующие параметры: константу скорости выщелачивания, сут⁻¹; начальный удельный объем вещества, д.ед.; скорость фильтрации или инфильтрации, дм/сут; плотность вещества, г/дм³; концентрацию насыщенного раствора, г/дм³.

Для определения константы скорости выщелачивания на специальном стенде проводится фильтрационный опыт. Навеска опытного материала объемом 500 мл помещается в фильтрационную колонку, и через нее фильтруется дистиллированная вода с рН, соответствующим рН осадков или фильтрационных вод данного района. Скорость фильтрации должна быть приближена к реальной обстановке. С момента поступления фильтрата начинается отсчет времени и ведется отбор проб.

Исследование выноса загрязняющих веществ из шламов и шлаков показало, что шлаки, имеющие более высокое содержание металлов, более грубодисперсный состав и вследствие этого меньшую площадь контакта твердой и жидкой фаз, обладают более низкой способностью к выщелачиванию [25-27]. Авторами рассчитано время полного выщелачивания металлов в рассматриваемых отходах. Этот период учитывает время контакта водной и твердой фаз. Для отходов сухого складирования при средней продолжительности осадков около восьми часов и среднего периода без осадков 40 дней общая продолжительность контакта осадков и твердой фазы составит около одних суток в год. С учетом этого время полного выщелачивания атмосферными осадками металлов из шламов составит сотни, а из шлаков – тысячи лет [28-30].

При обследовании территории хвостохранилища в Качканаре, проведенном в разные сезоны, выявлены семь источников формирования разгрузки подземных вод (табл.1). Таким образом, общий разрешенный расход сточных вод в результате разгрузки подземных вод с территории хвостохранилища составляет 30796,0 тыс. м³/год. Со сточными водами в водные объекты поступают взвешенные вещества, сульфаты, соединения азота, железо, ванадий, медь, нефтепродукты. Основным экологически опасным компонентом в шламовом водообороте является поставляемый карьерными водами нитрат-ион [31].

Оценка воздействия подземных вод в ОРО на поверхностную и подземную гидросферу. Проведем анализ воздействия на поверхностные и подземные воды одного из крупнейших хвостохранилищ Среднего Урала, являющегося объектом размещения отходов – хвостов обогащения титаномagnetитовых руд Гусевгорского месторождения. Площадь хвостохранилища составляет 19,75 км². В состав хвостохранилища входят дамбы: № 1 (насыпная с максимальной высотой 82,5 м), № 2 (насыпная с максимальной высотой дамбы – 61,5 м) и восточная (намывная высотой 79 м). Фильтрационными водами дамб формируются три выпуска сточных вод, которые попадают в р. Выя. Сравнение объемов фактического сброса сточных вод с хвостохранилища в реку с разрешенными значениями в динамике последних лет приведено в табл.2.



Таблица 1

Показатели разгрузки подземных вод хвостохранилища в Качканаре

Источник выделения загрязняющих веществ		Загрязняющее вещество	Объем сброса сточных вод		
			тыс. м³/год	мг/дм³	т/год
Рогалевский отсек	Фильтрация через дамбу № 3 (выпуск № 4)	Взвешенные вещества	1361,0	4,0	5,444
		Сухой остаток		387,0	526,707
		БПК ₂₀		2,5	3,403
		БПК ₅		1,9	2,586
		Сульфаты		54,0	73,494
		Нитрат-ион		45,0	61,245
		Нитрит-ион		0,18	0,245
		Азот аммонийный		0,1	0,136
		Железо		0,34	0,463
		Ванадий		0,01	0,014
		Медь		0,0126	0,017
		Нефтепродукты		0,11	0,150
	Фильтрация через дамбу № 4 (выпуск № 10)	Взвешенные вещества	1499,0	3,75	5,621
		Сухой остаток		385,0	577,115
		БПК ₂₀		5,3	7,945
		БПК ₅		3,5	5,247
		Сульфаты		53,0	79,447
		Нитрат-ион		45,0	67,455
		Нитрит-ион		0,19	0,285
		Азот аммонийный		0,1	0,150
		Железо		0,3	0,450
		Ванадий		0,003	0,004
		Медь		0,0089	0,013
		Нефтепродукты		0,11	0,165
Итого по Рогалевскому отсеку 2860,0 тыс. м³/год					
Промежуточный отсек	Фильтрация через дамбу № 1 (выпуск № 2)	Взвешенные вещества	521,0	4,0	2,084
		Сухой остаток		393,0	204,753
		БПК ₂₀		3,0	1,563
		БПК ₅		2,0	1,042
		Сульфаты		56,0	29,176
		Нитрат-ион		40,0	20,840
		Нитрит-ион		0,08	0,042
		Азот аммонийный		0,39	0,203
		Железо		0,21	0,109
		Ванадий		0,002	0,001
		Медь		0,001	0,001
		Нефтепродукты		0,05	0,026
	Фильтрация через дамбу № 2 (выпуск № 3)	Взвешенные вещества	3632,0	2,75	9,988
		Сухой остаток		384,0	1394,688
		БПК ₂₀		2,9	10,533
		БПК ₅		2,0	7,264
		Сульфаты		51,0	185,232
		Нитрат-ион		45,0	163,440
		Нитрит-ион		0,13	0,472
		Азот аммонийный		0,1	0,363
		Железо		0,34	1,235
		Ванадий		0,01	0,036
		Медь		0,0126	0,046
		Нефтепродукты		0,19	0,690
	Фильтрация через восточную дамбу (выпуск № 9)	Взвешенные вещества	3095,0	2,78	8,604
		Сухой остаток		388,0	1200,860
		БПК ₂₀		2,7	8,357
		БПК ₅		1,8	5,571
		Сульфаты		53,0	164,035
		Нитрат-ион		45,0	139,275
		Нитрит-ион		0,2	0,619
		Азот аммонийный		0,1	0,310
		Железо		0,34	1,052
		Ванадий		0,003	0,009
		Медь		0,0094	0,029
		Нефтепродукты		0,11	0,340
Итого по Промежуточному отсеку 7248,0 тыс. м³/год					



Окончание табл.1

Источник выделения загрязняющих веществ		Загрязняющее вещество	Объем сброса сточных вод		
			тыс. м³/год	мг/дм³	т/год
Выйский отсек	Сифонный выпуск с хвостохранилища в р. Выя (выпуск № 1)	Взвешенные вещества	20688,0	9,0	186,192
		Сухой остаток		304,0	6289,152
		БПК ₂₀		3,0	62,064
		БПК ₅		2,0	41,376
		Сульфаты		56,0	1158,528
		Нитрат-ион		40,0	827,520
		Нитрит-ион		0,08	1,655
		Азот аммонийный		0,39	8,068
		Железо		0,21	4,344
		Ванадий		0,002	0,041
		Медь		0,001	0,021
		Нефтепродукты		0,05	1,034
Итого по Выйскому отсеку			20688,0	тыс. м³/год	

Таблица 2

Динамика объемов фактического сброса сточных вод с хвостохранилища в р. Выя и их сравнение с разрешенными значениями

Наименование выпуска сточных вод	Сброс сточных вод, тыс. м³		Кратность превышения фактического сброса величины НДС
	Фактический	Нормативно- допустимый (НДС)	
2018			
Дамба № 1	60	132	–
Дамба № 2	3940	3750	1,1
Восточная дамба	1130	1910	–
2019			
Дамба № 1	521,0	120,0	4,3
Дамба № 2	3632,0	5100,0	–
Восточная дамба	2090,0	2890,0	–
2020			
Дамба № 1	429,7	521,0	–
Дамба № 2	4049,6	3632,0	1,1
Восточная дамба	3201,5	2090,0	1,5

Как видно из табл.2, по всем выпускам за рассматриваемый отрезок времени отмечаются резкие колебания объемов с периодическим превышением допустимого сброса. Рост объема сточных вод объясняется ростом тела дамбы из-за ее намыва, уменьшение объема происходит из-за увеличения тела дамбы вследствие пригрузки низовых откосов скальной породой.

Концентрации химических элементов и веществ в выпусках показывают, что существуют превышения над разрешенным сбросом по ряду показателей:

- В выпуске № 1: сухой остаток – до 1,1 раза (1 год из 5); БПК₂₀ – до 1,2 раза (1 из 5); сульфаты – до 1,1 раза (1 из 5); нитрат-ион – до 2,1 раза (5 из 5); нитрит-ион – до 2,5 раза (1 из 5); железо – до 2,1 раза (2 из 5); ванадий – до 1,7 раза (1 из 5); медь – до 3,0 раза (2 из 5).

- В выпуске № 2: сухой остаток – до 1,1 раза (1 год из 5); сульфаты – до 1,3 раза (1 из 5); нитрат-ион – до 1,8 раза (4 из 5); нитрит-ион – до 2,6 раза (2 из 5); железо – до 1,3 раза (1 из 5); ванадий – до 1,4 раза (1 из 5); медь – до 2,0 раза (1 из 5); нефтепродукты – до 2,2 раза (3 из 5).

- Фильтрация через восточную дамбу: сухой остаток – до 1,1 раза (1 год из 5); сульфаты – до 1,4 раза (1 из 5); нитрат-ион – до 1,8 раза (5 из 5); нитрит-ион – до 4,0 раза (3 из 5); железо – до 1,4 раза (1 из 5); медь – до 3,0 раза (1 из 5); нефтепродукты – до 2,2 раза (2 из 5).

При ведении горных работ применяются взрывчатые вещества, содержащие в больших концентрациях нитраты, которые также являются характерным загрязняющим веществом и имеют значительные превышения. Для взрывов используется аммиачная селитра с содержанием азота до 30 %. Ежегодно предприятием затрачиваются тысячи тонн взрывчатых веществ, и, соответственно, в окружающую среду поступают тысячи тонн азота.



Таблица 3

Результаты контроля природных вод р. Выя

Показатели состава	ПДК _{р/х} * для водных объектов, мг/дм ³	Фоновые концентрации, мг/дм ³	Содержание загрязняющих веществ в контрольном створе (после всех выпусков), мг/дм ³
Взвешенные вещества	+0,75 к фону	3,0	3,0
Сухой остаток	–	67,7	315,0
БПК ₂₀	3,0	5,0	4,98
Сульфаты	100	4,90	45,0
Азот нитратов (нитрат-ион)	9,1	0,99	94,0
Нитрит ион	0,02	0,03	0,055
Ванадий	0,001	0,0015	0,0037
Медь	0,001	0,002	0,0029

* В качестве критерия степени загрязнения подземных вод принято значение предельно допустимой концентрации для рыбохозяйственных водоемов (ПДК_{р/х}), в связи с тем, что подземные воды в районе хвостохранилища участвуют в питании поверхностных водоемов и водотоков, имеющих рыбохозяйственную ценность.

Таблица 4

Результаты опробования подземных вод в районе хвостохранилища

Наименование показателя	ПДК _{р/х} , мг/дм ³	2018		2019		2020	
		Содержание компонентов, мг/м ³	Кратность ПДК	Содержание компонентов, мг/м ³	Кратность ПДК	Содержание компонентов, мг/м ³	Кратность ПДК
Скважина 9							
Сульфаты	100	49,3	–	33,4	–	37,9	–
Хлориды	300	26,0	–	4,86	–	10,2	–
Нитраты	40	3,03	–	2,77	–	0,43	–
Марганец	0,01	1,27	127	0,096	9,6	0,154	15,4
Медь	0,01	0,009	–	0,014	1,4	0,003	–
Железо	0,1	0,466	4,66	0,3	3	3,18	31,8
Цинк	0,01	0,012	1,2	0,014	1,4	0,031	3,1
Ванадий	0,001	0,0664	66,4	0,027	27	0,009	9
Сухой остаток	1000	232,0	–	53,0	–	172,3	–
Взвешенные вещества	3,25	0,3	–	581,6	179	812,3	250
Скважина 10							
Сульфаты	100	98,1	–	–	–	–	–
Хлориды	300	5,2	–	–	–	–	–
Нитраты	40	3,4	–	–	–	–	–
Марганец	0,01	4,0	400	–	–	–	–
Медь	0,01	0,031	3,1	–	–	–	–
Железо	0,1	0,326	3,26	–	–	–	–
Цинк	0,01	0,034	3,4	–	–	–	–
Ванадий	0,001	0,0328	32,8	–	–	–	–
Сухой остаток	1000	348,0	–	–	–	–	–
Взвешенные вещества	3,25	2,58	–	–	–	–	–
Скважина 11							
Сульфаты	100	71,3	–	79,3	–	96,6	–
Хлориды	300	3,47	–	8,1	–	12,2	–
Нитраты	40	1,6	–	2,34	–	1,17	–
Марганец	0,01	0,126	12,6	0,058	5,8	0,116	11,6
Медь	0,01	0,022	2,2	0,007	–	0,003	–
Железо	0,1	0,217	2,17	2,83	28,3	1,13	11,3
Цинк	0,01	0,006	–	0,034	3,4	0,009	-
Ванадий	0,001	0,0177	17,7	0,015	15	0,036	36
Сухой остаток	1000	176,0	–	101,0	–	302,0	–
Взвешенные вещества	3,25	18,98	5,8	545,6	168	812,3	250

Примечание. В качестве критерия степени загрязнения подземных вод предлагается принять фоновую скважину 4-н, в связи с тем, что некоторые загрязняющие вещества (например, медь, марганец, ванадий, железо) являются характерными для района, что связано с многочисленными рудными залежами на рассматриваемой территории и большим количеством действующих и выведенных из эксплуатации горных выработок различной глубины и площади, а также накопителей отходов, выпусков сточных вод промышленных предприятий.

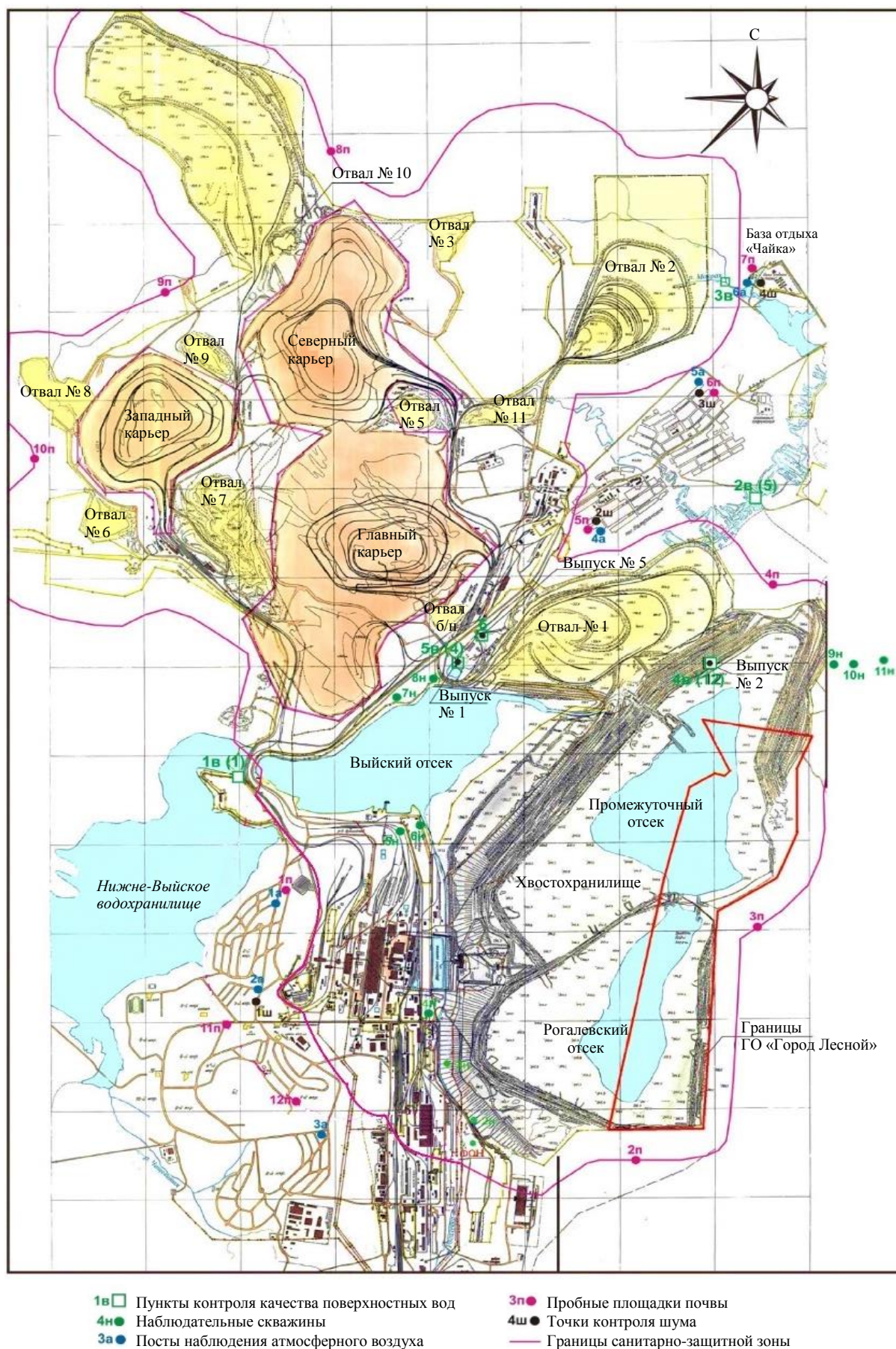


Рис.3. Расположение пунктов наблюдений в сети мониторинга



Объективными показателями уровня негативного воздействия техногенного объекта на водоток являются фоновые значения контролируемых в стоках загрязняющих веществ и результаты анализов в контрольном створе после всех выпусков [32-34]. Для определения фоновых концентраций веществ в реки принят створ, расположенный выше выпусков сточных вод. Контроль за состоянием р. Выя после сбросов сточных вод от всех выпусков осуществляется предприятием в контрольном створе, расположенном ниже выпусков. Среднегодовые результаты контроля за природными водами реки приведены в табл.3.

Анализ табл.3 показывает, что по сравнению с фоновыми значениями концентраций химических веществ в р. Выя в контрольном створе увеличивается содержание следующих загрязняющих веществ: сухого остатка – на 246,4 мг/л (в 4,7 раза, без превышения значения ПДК_{р/х}); сульфатов – на 40,13 мг/л (в 9,2 раза, без превышения ПДК_{р/х}); азота нитратов – на 92,5 мг/л (в 93,5 раза); нитрит-иона – на 0,05 мг/л (в 2,5 раза); ванадия – на 0,0022 мг/л (в 2,57 раза); меди – на 0,0008 мг/л (в 1,4 раза).

Механизм воздействия хвостохранилища на состояние подземных вод заключается в утечках шламовых вод через дамбу № 1 (выпуск сточных вод № 2), дамбу № 2 и восточную дамбу (выпуски № 3 и 9) в долине р. Выя, где намечается зона техногенного воздействия на состояние подземной гидросферы.

Исследование подземных вод в районе хвостохранилища осуществляется на специально созданной для этих целей сети наблюдательных скважин (рис.3) [35]. Воздействие хвостохранилища на подземные воды характеризуется содержанием загрязняющих веществ в скважинах 9, 10 и 11 наблюдательной сети [35]. Опробование данных скважин проводилось ежеквартально. Результаты опробования представлены в табл.4.

Результаты исследований подземных вод горизонта региональной трещиноватости, отобранных в районе хвостохранилища, указывают на существенное загрязнение подземных вод по следующим показателям: марганец (до 400 ПДК), железо (до 67 ПДК), цинк (до 4 ПДК), ванадий (до 67 ПДК), взвешенные вещества (до 250 ПДК).

Заключение. В гидрогеологии, как одном из разделов наук о Земле, накоплен большой материал для формирования нового научного направления о подземных водах в объектах размещения отходов. Установлено, что гидрогеоэкологические условия подземных вод в объектах размещения отходов зачастую являются сложными по условиям формирования расходов и качеству подземных вод. Определены факторы формирования подземных вод в ОРО, которые связаны с условиями размещения и морфометрическими параметрами, гранулометрическим и химическим составом отходов.

На примере одного из ОРО Среднего Урала показано, что подземные воды объектов размещения отходов оказывают значительное негативное воздействие на поверхностную и подземную гидросферу. Поэтому необходимо планомерное изучение гидрогеологических условий подземных вод ОРО как на стадии эксплуатации, так и в период консервации отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коновалов В.Е. Реабилитация горнопромышленных ландшафтов // Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов: Труды VI Международной научно-практической конференции 10 апреля 2018 / Отв. ред. А.И.Семячков. Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, Уральский государственный горный университет, 2018. С. 89-95.
2. Семячков А.И., Почечун В.А., Коновалов В.Е., Ганин Е.В. Экологическая концепция реабилитации горнопромышленных ландшафтов // Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2020. 190 с.
3. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2018. 288 с.
4. Danilov A., Smirnov Y., Korelskiy D. Effective methods for reclamation of area sources of dust emission // Journal of Ecological Engineering. 2017. Vol. 18. Iss. 5. P. 1-7. DOI: 10.12911/22998993/74947
5. Strizhenok A.V., Korelskiy D.S. Improvement of the system of industrial environmental monitoring of atmospheric air in the area of anthropogenic arrays impact // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1384 (1). № 012052. DOI: 10.1088/1742-6596/1384/1/012052
6. Семячков А.И., Славиковская Ю.О., Почечун В.А. Методологические особенности оценки экономического ущерба от неблагоприятных экологических последствий в условиях территорий с развитым горнопромышленным комплексом // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 4. С. 46-51.



7. Стратегические направления и приоритеты регионального развития в условиях глобальных вызовов / Под общ. ред. Ю.Г.Лавриковой, Е.Л. Андреевой. Екатеринбург: УрО РАН, 2019. 504 с. DOI: 10.17059/1_2019
8. Антонинова Н.Ю., Рыбникова Л.С., Славиковская Ю.О., Шубина Л.А. Эколого-экономические аспекты выбора направлений реабилитации территорий размещения промышленных отходов горно-металлургического комплекса // Горная промышленность. 2022. № S1. С. 71-77. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-71-77
9. Ляшенко В.И., Воробьев А.Е., Хоменко О.Е., Дудар Т.В. Развитие технологий и технических средств для снижения воздействия на окружающую среду в зоне влияния хвостохранилища // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова. 2022. Т. 20. № 1. С. 25-41. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-1-25-41
10. Плохов А.С., Харько П.А., Пашкевич М.А. Исследование влияния хвостового хозяйства медно-колчеданного месторождения на поверхностные воды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 4. С. 57-68. DOI: 10.25018/0236-1493_2021_4_0_57
11. Хансигарова Н.М. Оценка механической устойчивости и защищенности подземных вод на территориях распространения дисперсных просадочных грунтов // Естественные и технические науки. 2021. № 10 (161). С. 120-125. DOI: 10.25633/ETN.2021.10.06
12. Ковригин А.А., Слесарев М.Ю. Модель изменения гидротехнических характеристик территории полигона твердых промышленных и бытовых отходов // Вестник Московского государственного строительного университета. 2021. Т. 16. № 6. С. 770-780. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.770-780
13. Лямин И.А., Рузманов Р.Ю. Оценка защищенности подземных вод на территории размещения отходов горнодобывающего предприятия // Вестник Пермского университета. Геология. 2020. Т. 19. № 3. С. 241-246. DOI: 10.17072/psu.geol.19.3.241
14. Баев О.А., Сильченко В.Ф. Анализ воздействия накопителей на поверхностные и подземные воды (обзор) // Экология и водное хозяйство. 2020. № 4 (7). С. 100-113. DOI: 10.31774/2658-7890-2020-4-100-113
15. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Физико-химическая модель формирования подземных вод в районах затопленных медноколчеданных рудников Урала // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № S37. С. 584-595. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-584-595
16. Сабуров Х.М., Мурадов Б.З., Мухамедгалиев Б.А. Загрязнение окружающей природной среды отходами производства // Булатовские чтения. 2019. Т. 4. С. 110-111.
17. Коновалов В.Е., Германович Ю.Г. Миграция вещества при добыче полезных ископаемых и их первичной переработке // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2018. № 2. С. 30-39. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-2-30-39
18. Хайрулина Е.А. Воздействие фильтрационных вод шламохранилища с соледержащими отходами на поверхностные и подземные воды // Географический вестник. 2018. № 2 (45). С. 145-155. DOI: 10.17072/2079-7877-2018-2-145-155
19. Гюльмамедов Ч.Д. Влияние техногенной деятельности человека на гидрогеологические условия // Наука и мир. 2020. № 2-1 (78). С. 15-19.
20. Кузнецов Ю.С., Чапля Б.Ю., Хафизов А.Р., Шульгина А.П. Экологические аспекты проблемы складирования жидких отходов многотоннажных производств в подземных хранилищах // Нефтегазовое дело. 2019. Т. 17. № 3. С. 56-61. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-3-56-61
21. Клёцкина О.В., Ощепкова А.З. Методический подход к обоснованию критериев допустимого воздействия объекта размещения отходов на подземные воды с использованием гидрогеологического моделирования // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2019. № 2 (39). С. 337-342.
22. Пичура В.И., Скок С.В. Влияние урбосистем на гидрогеологические и гидрохимические условия водоносных горизонтов // Вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2019. № 6 (82). С. 1-16. DOI: 10.31548/dopovidi2019.06.001
23. Simion A.F., Drebenstedt C., Lazar M. The Influence of Tailings Storage Facilities in the Eastern Part of Jiu Valley on the Water Quality // Горная наука и техника. 2019. Т. 4. № 4. С. 292-301. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-4-292-301
24. Харлямов Д.А., Смирнова Н.Н., Шарафутдинов Р.Н., Маврин Г.В. Оценка качества подземных вод территорий с разной антропогенно-техногенной нагрузкой // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 2-2 (116). С. 28-33. DOI: 10.23670/IRJ.2022.116.2.036
25. Трофимова Ю.В., Расторгуев А.В. Оценка полигона твердых промышленных и бытовых отходов как источника загрязнения подземных вод // Инженерные изыскания. 2019. Т. 13. № 3. С. 28-39. DOI: 10.25296/1997-8650-2019-13-3-28-38
26. Дегтярь М.В., Галкина Е.П. Экологический мониторинг состояния окружающей среды объектов захоронения отходов // Наукові нотатки. 2019. № 65. С. 55-60.
27. Фисун Н.В. Экологический потенциал эколого-гидрогеологических систем в зоне влияния кучинского полигона твердых бытовых отходов (Московская область) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2018. № 3. С. 58-64.
28. Понамарев Ю.Ю., Хазипова В.В. Мониторинг подземных и поверхностных вод в зоне влияния полигона промышленных отходов // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2018. № 1 (1). С. 143-146.
29. Колесникова Л.А., Ковальчук Т.В. Проблемы и перспективы экологической безопасности горнодобывающих регионов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 2-1. С. 275-286. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-275-286
30. Шепелев И.И., Еськова Е.Н., Пиляева О.В. и др. Сохранение экологической стабильности управляемой природно-технической системы под влиянием антропогенных факторов // Проблемы региональной экологии. 2021. № 1. С. 76-82. DOI: 10.24412/1728-323X-2021-1-76-82
31. Мусихина Т.А., Юрлов А.А., Земцова Е.А., Филатов В.Ю. Комплексная оценка токсичности речных и сточных вод, формируемых на загрязненной промышленными отходами территории // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 133-139. DOI: 10.25750/1995-4301-2021-4-133-139



32. Ляшенко В.И., Голик В.И., Дятчин В.З. Повышение экологической безопасности при снижении техногенной нагрузки в горнодобывающих регионах // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 7. С. 529-538. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-529-538

33. Ахмадиев А.К., Экзарьян В.Н. Реабилитация природной среды – структурный элемент экологической безопасности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 2. С. 112-120. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-112-120

34. Глухов В.В., Мовчан К.С. Экономическая оценка технологии переработки отходов с учетом воздействия на окружающую среду // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2019. Т. 12. № 1. С. 159-167. DOI: 10.18721/JE.12113

35. Тагильцев С.Н., Чередниченко А.В., Мельник В.В. Комплексирование методов гидрогеомеханики, электроразведки и биолокации для выбора мест заложения гидрогеологических скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 3-1. С. 236-246. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-236-246

Авторы: **А.И.Семячков**, д-р геол.-минерал. наук, руководитель центра, <https://orcid.org/0000-0002-3352-2863> (Институт экономики Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия), **В.А.Почечун**, д-р географических наук, заведующий лабораторией, viktoriyapochechun@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2838-1162> (Институт экономики Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия), **К.А.Семячков**, канд. экон. наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-0998-0183> (Институт экономики Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.