ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(11-1):71–89
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 504.06:556 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_71

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПРИРОДООХРАННЫХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НА ПРИМЕРЕ НАКОПИТЕЛЕЙ ЖИДКИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

А. В. Хохряков[1], П. А. Рыбников[1,2], Е. М. Цейтлин[1], И. В. Коновалов[1]

[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия;
[2] Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация: Приведены характерные особенности накопителей жидких промышленных отходов угольных электростанций. Представлены результаты мониторинга качества окружающей среды в районе накопителя жидких промышленных отходов. Выполнен анализ данных экологического мониторинга за период 2010–2020 гг. По результатам сделаны выводы об отсутствии утечек из контролируемого накопителя. Проанализированы факторы, влияющие на риск недостоверности сделанных по результатам мониторинга выводов об отсутствии утечек. Даны определения достоверности результатов экологического мониторинга применительно к накопителям жидких промышленных отходов. Выполнена идентификация факторов, влияющих на достоверность выводов по результатам мониторинга. Представлен подход к определению уровня воздействия каждого из идентифицированных факторов на достоверность выводов, сделанных по результатам экологического мониторинга накопителей жидких промышленных отходов. Выполнен обзор существующих направлений оценки экологического риска для разных отраслей промышленности. С учетом влияния внешних факторов разнокачественного характера предложен методический подход к оценке экологического риска, наличие которого авторы считают необходимым учитывать при принятии в условиях неопределенности управленческих и технических решений, направленных на обеспечение экологической безопасности накопителей жидких промышленных отходов. В качестве примера рассчитан риск наличия утечек из накопителя жидких промышленных отходов, существующего более 50-ти лет. Представлен аппарат и основные положения расчета экологического риска применительно к накопителям жидких промышленных отходов. Сделаны выводы о возможных направлениях применения такого подхода.

Ключевые слова: накопитель жидких промышленных отходов, экологический риск, вероятность, неопределенность, золоотвал ГРЭС, мониторинг, управление окружающей средой, концентрация загрязняющих веществ, достоверность, метод разнокачественных показателей.

Для цитирования: *Хохряков А. В., Рыбников П. А., Цейтлин Е. М., Коновалов И. В.* Использование интегрального показателя экологического риска для обоснования природоохранных решений в условиях неопределенности на примере накопителей жидких промышленных отходов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11-1. – С. 71–89. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_71.

© А. В. Хохряков, П. А. Рыбников, Е. М. Цейтлин, И. В. Коновалов. 2021

Integrated environmental risk index in justification of nature-oriented decision-making under uncertainty: A case-study of liquid industrial storage

A. V. Khokhryakov[1], P. A. Rybnikov[1,2], E. M. Tseytlin[1], I. V. Konovalov[1]

[1] Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia;
[2] Institute of Mining Ural Branch Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Abstract: Liquid industrial waste storages at coal-fired electric power plants are described. The environment quality monitoring data on the liquid industrial waste storage and neighborhood are reported. The ecological monitoring data over the period from 2010 to 2020 are analyzed. It is concluded on the absence of leakage from the test waste storage. The factors of uncertainty risk of zero leakage estimates from the monitoring data are analyzed. The ecological monitoring data reliability is determined for the liquid industrial waste storages. The factors affecting certainty of the monitoring-based estimates are identified. The approach to evaluation of weight of each factor in uncertainty risk of estimates based on the ecological monitoring data on liquid industrial waste storages is presented. The recent trends in the environmental risk assessment in different industries are reviewed. Considering different-nature external factors, a guideline is offered for the environmental risk assessment, which is critical by the authors' opinion when making managerial and engineering decisions under uncertainty, toward environmental safety of liquid industrial waste storages. The calculation of leakage risks at more than 50 years old liquid industrial waste storage is given. The tool and key point of ecological risk assessment of liquid industrial waste storages are described. The ways of using the proposed approach are identified.

Key words: liquid industrial waste storage, environmental risk, probability, uncertainty, ash dump at recirculating water power plant, monitoring, environmental control, contaminant concentration, reliability, quality index method.

For citation: Khokhryakov A. V., Rybnikov P. A., Tseytlin E. M., Konovalov I. V. Integrated environmental risk index in justification of nature-oriented decision-making under uncertainty: A case-study of liquid industrial storage. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11-1):71–89. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_71.

Введение

Одним из типов объектов размещения отходов являются накопители жидких промышленных отходов. По состоянию на 2020 год на территории Российской Федерации зарегистрировано около 2000[1] объектов размещения различных жидких промышленных отходов [1]. Применительно к угольным электростанциям к таким объектам относятся накопители промывочных вод. При эксплуатации энергетических котлов для удаления отложений с внутренних поверхностей труб проводятся химические промывки пароводяного тракта. Образующиеся при этом стоки от химпромывок — отходы оксидов и гидроксидов, — размещаются в нефильтруемых котлованах промывочных вод.

Такие промывки могут проводиться от 1—2 раз в год до 1 раза в несколько лет, если применяется кислородно-аммиачный водный режим. В качестве компонентов рабочего раствора при промывке используются фторид аммония и серная кислота. В процессе

[1] Данные были получены механическим подсчетом с использованием информации из ГРОРО [1]

промывки из пароводяного тракта котла подаются в накопитель промывные воды в смеси с малорастворимыми соединениями оксидов и основных карбонатов железа, цинка и меди. Характерным компонентом промывочных вод являются сульфаты, т. к. промывка, как правило, осуществляется с использованием серной кислоты.

Не исключено, что в прошлые периоды в подобных объектах размещались дополнительно и другие отходы — от отработанных кислот до гальванических шламов и отработанных масел, — что безусловно повышает потенциальную опасность таких объектов для окружающей среды.

В соответствии с [1] упомянутые выше накопители жидких отходов имеются в целом ряде субъектов федерации, в том числе в Свердловской области, республике Татарстан, Рязанской области и др.

Как правило, это котлованы с соответствующей обваловкой и гидроизоляцией, в которые в течение продолжительного периода сливались жидкие промышленные отходы 2—4 классов опасности. Большинство подобных накопителей отходов было построено в последней трети прошлого века. Их нормативный срок службы составляет 50 лет [2, п. 8.21].

Окончание нормативного срока службы повышает вероятность нарушения целостности покрытия дна и стенок котлована. Наибольшую потенциальную опасность представляет воздействие таких объектов на подземные и поверхностные воды, так как существует риск появления трещин в изолирующем покрытии дна котлована, формировании фронта загрязнения под дном и движения этого фронта в зону разгрузки (речную сеть или нагорные канавы).

Ведение мониторинга окружающей среды на территориях объектов размещения отходов и в пределах зон их воздействия является обязательным. Порядок ведения мониторинга определяет Приказ Минприроды России от 08.12.2020 N 1030 [3].

Авторы исследования на протяжении более десяти лет проводили работы по мониторингу подземных вод в районе расположения одного из накопителей жидких отходов в Уральском регионе.

Цель настоящей работы — показать, что, помимо практикуемых прямых и однозначных ежегодных оценок результатов мониторинга только на предмет наличия или отсутствия утечек, необходимо использовать вероятностный показатель в виде периодической ежеквартальной оценки риска появления утечек из накопителя жидких отходов, чтобы обосновать необходимость принятия оперативных технических и управленческих решений.

Задачи

1. Обработать и проанализизировать существующие данные мониторинга подземных вод.

2. Обосновать целесообразность оценки риска наличия утечки жидкой фазы из накопителя жидких отходов на основе существующих данных мониторинга.

3. Предложить методический подход и апробацию расчетного аппарата оценки риска существования утечек из накопителя промывных вод.

Методы

При анализе материала, положенного в основу статьи, были использованы методы эмпирического исследования (наблюдение, сравнение, измерение, эксперимент), методы, используемые на теоретическом уровне исследований (методы анализа и синтеза).

Описание объекта исследований

Накопитель жидких отходов расположен на первом ярусе в теле недействующего золоотвала ГРЭС. Всего у золоотвала имеется 2 яруса. Вокруг золоотвала проходит нагорная канава протяженностью около 2 км, глубиной до 1 м, которая улавливает воды техногенного водоносного горизонта, образующегося в теле золоотвала (рис. 1).

В плане накопитель представляет собой квадратную дамбу[1] с примерно равными по длине бортами. Его общая площадь составляет около 4 га. Накопитель представляет собой нефильтрующую открытую емкость с асфальтовым покрытием дна и откосов. Устойчивость от разрушения содержащейся в промывочной воде кислотой достигается за счет защитного слоя кислотоупорного асфальта с поверхностным битумным покрытием (рис. 2).

По результатам опробования можно сделать вывод о том, что химический состав сточных вод, отобранных с поверхности накопителя, сформировался за счет отстаивания накопленных отходов и разбавления их жидкой фазы атмосферными осадками. Об этом свидетельствуют низкие содержания в воде таких компонентов-маркеров, как сульфаты и отсутствие основных компонентов-загрязнителей (особенно в сравнении с составом донных отложений).

По результатам инженерно-геодезических и инженерно-геологических изысканий была построена карта гидроизогипс (рис. 3) и определено направление потока подземных вод, которое за период с 2010 г. по 2020 г. не менялось и является юго-восточным.

Накопитель жидких отходов спроектирован и введен в эксплуатацию

[1] Здесь и далее данные по накопителю жидких отходов взяты из проектной документации предприятия.

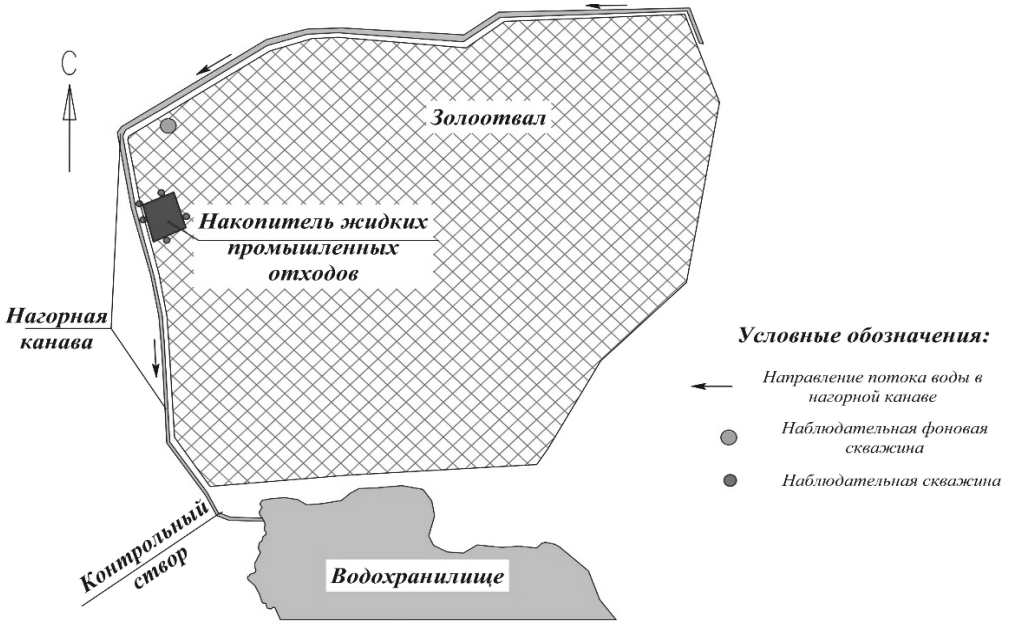

Рис. 1. Схема расположения накопителя промывочных вод
Fig. 1. Layout of flushing water storage

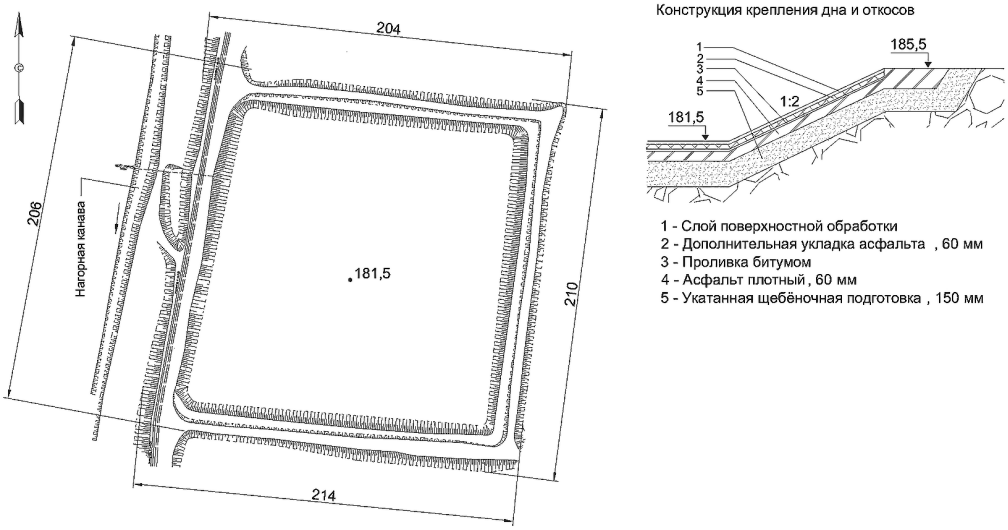

Рис. 2. Схема конструкции накопителя жидких отходов
Fig. 2. Structure diagram of liquid waste storage

в 70-х годах 20 века одновременно с золоотвалом. В накопителе жидких отходов размещались отходы I — IV класса опасности, в т. ч. образующиеся при очистке оборудования угольных электростанций, отходы кислоты аккумуляторной, отходы электролитов, отходы специфических моторных масел[1].

С 2012 года размещение отходов в накопитель жидких отходов не осуществляется, объект используется для хранения ранее накопленных отходов.

По состоянию на 2021 год нормативный срок службы истек, в связи с чем особую актуальность приобретают задачи контроля сохранения конструктивных параметров накопителя, в том числе целостности гидроизоляционного асфальтового покрытия дна и откосов котлована, а также проведение оценки риска утечек из накопителя отходов.

В период с 2010 по 2020 гг. проводились работы, направленные на выявление возможных утечек из накопителя жидких отходов и включающие в себя инженерно-геодезические изыскания и геофизические исследования, буровые работы и последующие мониторинговые наблюдения за химическим составом подземных вод.

Выполненные исследования показали отсутствие утечек жидкой фазы из накопителя жидких отходов. При этом существует несколько факторов, которые могли повлиять на результаты мониторинга.

В рамках указанных выше исследований единоразово было проведено

[1] Информация о наименовании специфического масла не может быть приведена по техническим и коммерческим причинам. Данные масла являются высокотоксичными соединениями. Их плотность колеблется от 1,36 до 1,63 г/см3 (при 65°С). Хорошо растворимы в ацетоне, эфире, бензоле, толуоле, хлороформе и спирте, плохо растворимы в бензине, петролейном эфире, воде, негорючи и взрывобезопасны, обладают высокой термической устойчивостью. Попавшие в поверхностные воды сорбируются на взвешенных в воде частицах, оседают на дно, накапливаясь в донных отложениях. В обычных условиях весьма стабильны и практически не разлагаются в концентрированных кислотах и щелочах. В естественных условиях скорость разложения крайне низкая. Время их полураспада в почве достигает 8 — 10 лет.

опробование воды, содержащейся внутри котлована промывочных вод (глубина отбора проб составляла до 0,5 м) и донных отложений. Результаты данного опробования приведены в табл. 1.

Для обоснования выбора месторасположения скважин были проведены геофизические исследования и определены аномальные зоны [4] — зоны повышенной трещиноватости, выветривания и разуплотнения скальных пород, характеризующихся повышенной водообильностью. В указанных аномальных зонах пробурены 5 наблюдательных скважин в непосредственной близости к бортам накопителя. Кроме того, для определения доли химических веществ, поступивших с утечками непосредственно из котлована в подотвальных водах с их уже сложившимся за многолетний период эксплуатации золоотвала № 1 химическим составом, была пробурена дополнительная «фоновая» скважина на расстоянии около 300 м севернее накопителя в теле золоотвала №1. Глубина скважин составила около 32 метров.

На участке размещения золоотвала уровень грунтовых вод составляет от 2 до 3 метров, при этом имеет направление с северо-запада на юго-восток в сторону Рефтинского водохранилища. В свою очередь в пределах тела золоотвала формируется техногенный водоносный горизонт, который имеет глубину залегания от поверхности от 5 до 7 метров и направление потока от наиболее возвышенной части золоотвала к его периферии и ограничен нагорной канавой, опоясывающей по периметру золоотвал. С южного и юго-западного бортов котлована выявлено активное заболачивание территории, что обусловлено выходом на поверхность вод техногенного водоносного горизонта, направленных в сторону нагорной канавы, и встречающего на своем пути препятствие

Таблица 1

Химический состав сточной воды и донных отложений из котлована промывочных вод (некоторые показатели)

Chemical composition of waste water and bottom sediments from flushing water pit (some indicators)

№ п/п	Показатель	Содержание, мг/кг в донных отложениях котлована	Содержание, мг/м^3 в сточной воде котлована
1	pH (ед. pH)	7,84	8,66
2	Алюминий	10590,00	0,78
5	Железо	6850,00	2,60
8	Кальций	32771,00	24,10
9	Магний	12277,00	17,70
11	Медь	206,00	0,07
12	Мышьяк	39,20	< 0,005
14	Нефтепродукты	429,00	0,037
17	Свинец	32,50	0,011
18	Сера (сульфат-ион)	31412,00	56,60
20	Фтор (фторид-ион)	213,00	18,40
30	Влажность (%)	87,16	-
31	Массовая доля золы (%)	78,80	-
32	Специфические моторные масла	12,00	Не измерялось

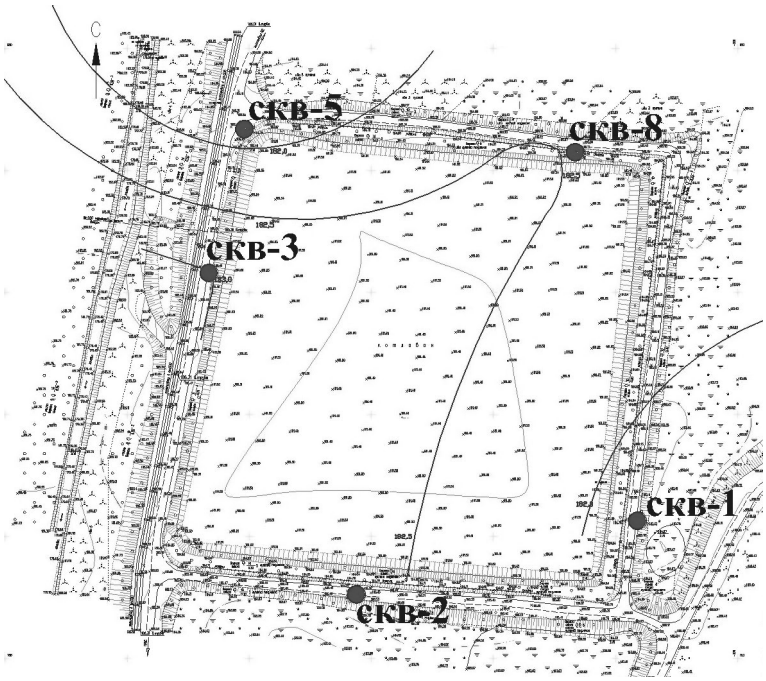

Рис. 3. Карта гидроизогипс, 2020 г., масштаб 1:2500
Fig. 3. Groundwater contour map 2020, Scale 1: 2500

в виде дамбы первого яруса (барражный эффект).

Высота первого яруса золоотвала в месте расположения наблюдательных скважин составляет не более 8 м. Таким образом, с учетом конструкции скважин и прилегающей гидрогеологической обстановки, можно сделать вывод о вскрытии скважинами естественного водоносного горизонта, приуроченного к скальным грунтам палеозойского возраста. В то же время наличие в верхней части геологического разреза суглинистых грунтов аллювиально-делювиального генезиса мезозойского возраста, мощность которых варьирует от 2,5 до 9,9 м в разных скважинах, предотвращает попадание в ствол скважины подземных вод техногенного водоносного горизонта, образованного в пределах золоотвала. Разгрузка техногенного водоносного горизонта происходит в нагорную канаву, опоясывающую золоотвал.

Полученные результаты

В период с 2010 года по 2020 год ежеквартально проводился отбор проб подземных и сточных вод (из скважин и водоотводной канавы), которые анализировались на содержание следующих показателей: pH, сульфаты, нефтепродукты, фториды, фенол, азот аммонийный, никель, хром общий, цинк, железо, ртуть, медь, специфические масла.

Для получения более объективных выводов по результатам анализов был выбран маркерный показатель сульфат-ион потому, что его концентрация значительна в донных отложениях (более 30 000 мг/кг) и данный элемент является консервативным (т. е. не сорбируется горными породами и не вступает в ионный обмен).

Значения маркерного показателя колебались в диапазоне от 10 до 200 мг/л (если исключить ураган-

ную пробу 300 мг/л), среднее значение было 125 мг/л. При этом в фоновой скважине сульфаты не превышали 150 мг/л, а большая часть проб характеризуется значениями в районе 50 мг/л. Динамика изменения концентраций сульфатов в подземных водах представлена на рис. 4 — 9

Исходя из рис. 5 — 10 можно сделать вывод, что утечки из накопителя промышленных вод отсутствуют в связи с тем, что концентрация сульфат-иона за весь период наблюдений находится в пределах природных значений, характерных для горноскладчатого Урала [5]. При этом в скважине №1 концентра-

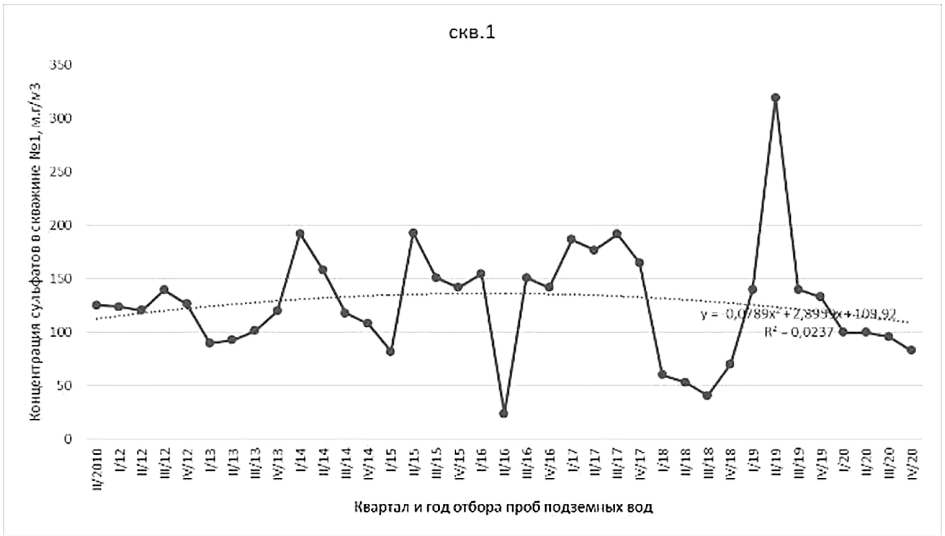

Рис. 4. Динамика изменения концентраций сульфатов в скважине №1 за период 2010—2020 гг.
Fig. 4. Change in concentrations of sulfates in well No. 1 in 2010–2020

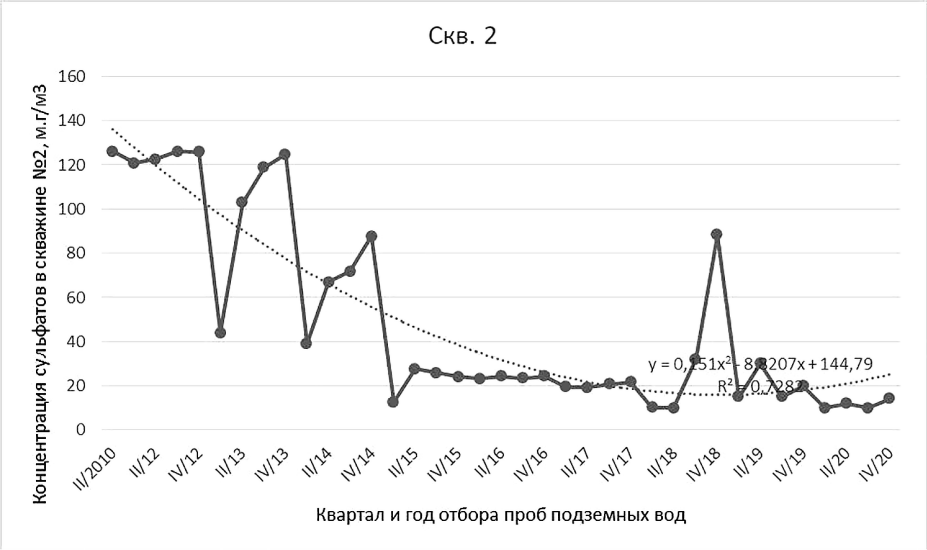

Рис. 5. Динамика изменения концентраций сульфатов в скважине №2 за период 2010—2020 гг.
Fig. 5. Change in concentrations of sulfates in well No. 2 in 2010–2020

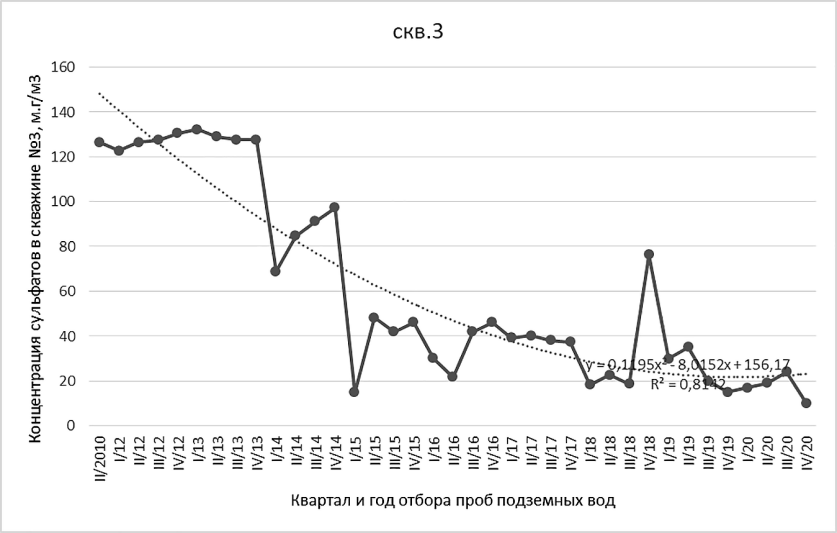

Рис. 6. Динамика изменения концентраций сульфатов в скважине №3 за период 2010—2020 гг.
Fig. 6. Change in concentrations of sulfates in well No. 3 in 2010–2020

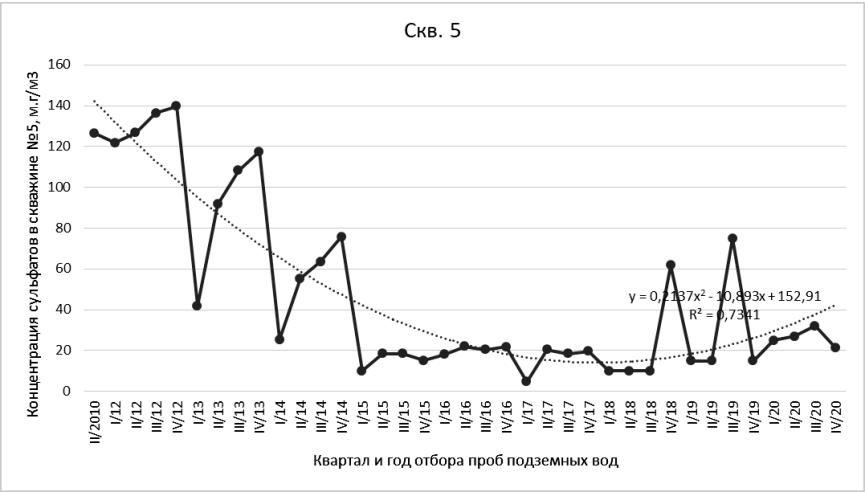

Рис. 7. Динамика изменения концентраций сульфатов в скважине №5 за период 2010—2020 гг.
Fig. 7. Change in concentrations of sulfates in well No. 5 in 2010–2020

ция сульфатов несколько выше, чем во всех остальных скважинах (в среднем в 2—3 раза). Отличия в составе воды в скважине №1 от других наблюдательных скважин в районе накопителя могут быть связаны с периодическим образованием болота в районе этой скважины и фильтрацией из него. Это дополнительно подтверждается данными, приведенными на рис. 10, где представлено изменение концентраций сульфат-иона в подземных водах скважины №1 и в контрольном створе в нагорной канаве.

Данные, представленные на рис. 10, подтверждают отсутствие утечек из накопителя. Концентрации сульфат-иона в контрольном створе и в подземных водах скважины 1 (которые

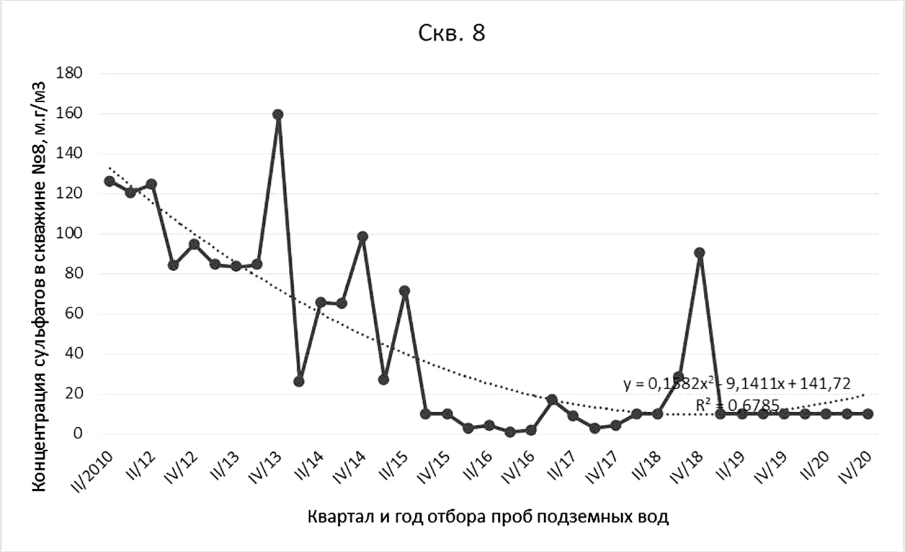

Рис. 8. Динамика изменения концентраций сульфатов в скважине №8 за период 2010—2020 гг
Fig. 8. Change in concentrations of sulfates in well No. 8 in 2010–2020

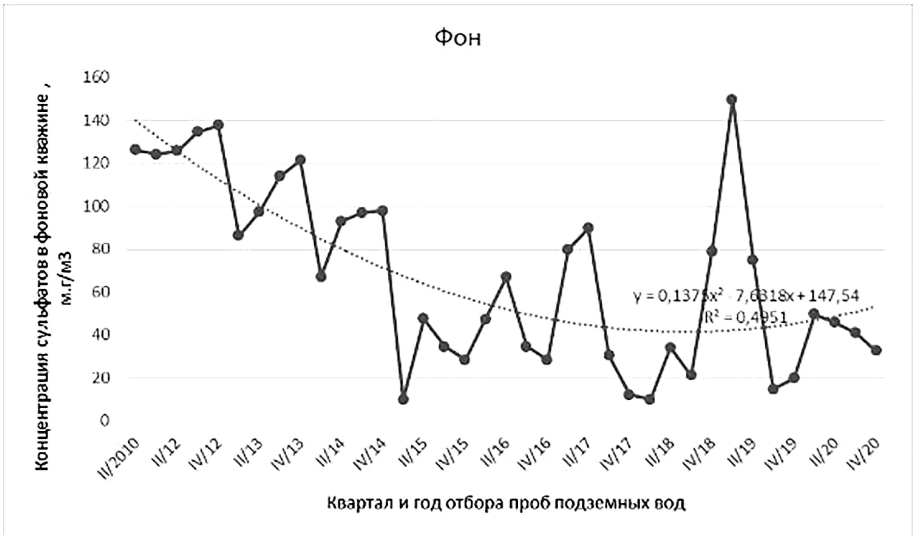

Рис. 9. Динамика изменения концентраций сульфатов в скважине №10 (фоновой) за период 2010—2020 гг
Fig. 9. Change in concentrations of sulfates in well No. 10 (background) in 2010–2020

характеризуются наибольшими превышениями над фоновыми значениями) не превышают природных концентраций, характерных для горноскладчатого Урала — 30—150 мг/л [5].

Еще одним маркерным веществом можно считать специфические моторные масла, содержание которых в донных отложениях составляет около 10 мг/кг. Это вещество можно считать маркерными, так как в природных условиях оно не существует и в случае его появления в подземных, поверхностных или сточных водах единственным

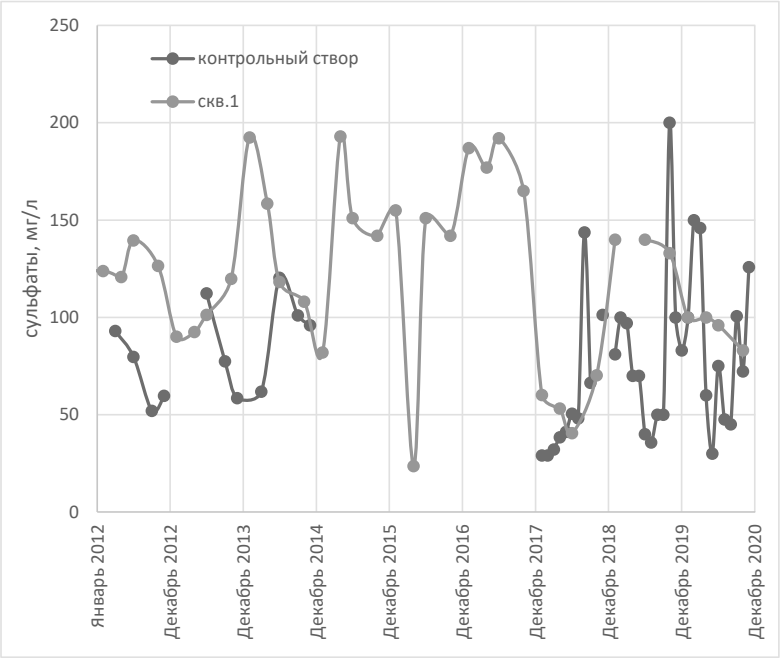

Рис. 10. Графики изменения концентраций сульфатов в скв. 1 и контрольном створе
Fig. 10. Change in concentrations of sulfates in well No. 1 and in control section

его источником может быть накопитель жидких отходов. Этот компонент-загрязнитель за десятилетний период наблюдений был зафиксирован единоразово в выпуске сточных вод в марте 2018 год. Предельно допустимая концентрация была превышена в 14 раз. Больше данные масла в подземных, поверхностных и сточных водах ни разу не фиксировались. Их значения всегда были ниже предела обнаружения лаборатории.

Фоновые концентрации по всем скважинам по всем контролируемым показателям за весь период наблюдений были превышены в 30% случаев. Это не говорит ни за, ни против наличия течи, т. к. превышения концентраций загрязняющих веществ над фоновыми не носят постоянного характера, хаотически возникая в разных скважинах по разным показателям.

Таким образом, анализ выше приведенного, а именно концентраций содержания сульфатов, специфических масел и иных компонентов в подземной воде свидетельствует о следующем:

1. Данные мониторинга показывают, что утечки из накопителя жидких отходов отсутствуют.

2. Существует вероятность того, что утечки из накопителя жидких отходов имеются, о чем говорят нижеприведенные факторы:

а) в пределах тела золоотвала получил распространение техногенный водоносный горизонт, на химический состав которого оказывают влияние золы, слагающие тело золоотвала. Этот водоносный горизонт разгружается в действующую нагорную канаву. Выбранная глубина наблюдательных скважин является чрезмерной. Скважинами вскрыт водоносный горизонт, приуроченный к скальным грунтам палеозойского возраста. Мощность тела золоотвала на участке размещения котлована составляет ориентировочно от 3,5

до 5,5 метров. Глубина наблюдательных скважин не должна превышать глубину распространения техногенного водоносного горизонта и составлять около 5—7 метров. Мощность фронта загрязнения в результате возможных утечек будет обусловлена глубиной и мощностью развития техногенного водоносного горизонта, базисом дренирования которого является нагорная канава. Имеется единоразовое ураганное превышение концентрации специфического моторного масла в выпуске сточных вод с нагорной канавы (в 14 раз). Данное загрязняющее вещество имеет техногенное происхождение и не существует в природе. Единственным источником его попадания в сточные воды может быть накопитель жидких отходов, где размещались специфические моторные масла. Наличие в сточных водах данного элемента потенциально может говорить о наличии утечек из накопителя;

б) за весь период наблюдений 30% значений концентраций всех контролируемых показателей превышали фоновые концентрации. Превышение фоновых концентраций загрязняющих веществ в подземных водах может говорить об утечках из накопителя. В свою очередь, превышения носят случайный бессистемный характер, что снижает риск наличия утечки.

С учетом вышеизложенного, руководству предприятия необходимо при принятии соответствующих решений учитывать вышеназванные факторы, влияющие на риск того, что накопитель жидких отходов все-таки имеет утечки, и принимать решения в условиях неопределенности. В соответствии с [6] неопределенность появляется из-за недостаточности и искажения информации, разнообразия природоохранных технологий, а также условий формирования и функционирования экологических систем.

Неопределенность — понятие, отражающее отсутствие однозначности в развитии процесса, а также отсутствие или недостаток информации о чем-либо. Неопределенность, наряду с другими качествами, обусловливает риск развития тех или иных опасностей [7], а применительно к накопителям жидких отходов — риск наличия утечек из накопителя и достоверность результатов мониторинга.

Существует два вида описания ситуаций, в которых точный исход неизвестен: риск и неизвестность. Ситуацию называют выбором в условиях риска, когда возможные исходы известны, при этом некоторые из этих исходов более благоприятны для агента, чем остальные. В отличие от выбора в условиях риска, выбор в условиях неопределённости подразумевает неизвестное множество исходов. Для принятия решения в условиях неопределенности необходимо неопределенность превратить в риск путём получения агентом дополнительных знаний о ситуации и использования этих знаний [8].

Результаты мониторинга не дают точного ответа на вопрос, имеются ли утечки из накопителя жидких отходов или нет.

В соответствии с [9—11] подходы к анализу и оценке риска загрязнения подземных вод можно разделить на вероятностный и детерминистический.

Для оценки вероятности используются разные методы: от субъективных оценок вероятности, метода аналогии и экспертных оценок риска до сложных статистических процедур и стохастического моделирования. На начальных стадиях исследования может использоваться экспертный подход, что обусловлено, как правило, недостатком информации.

Сегодня при определении вероятности возникновения аварии широ-

кое распространение получил метод балльно-рейтинговой оценки. Суть данного метода заключается в следующем: определяется перечень факторов, влияющих на риск возникновения аварии; каждому фактору присваиваются соответствующие значения в баллах, при необходимости добавляется весовой коэффициент [10—19]. В качестве факторов для разных ситуаций используются следующие: глубина до зеркала воды, интенсивность питания; параметр водоносного слоя, параметры грунтов, топография, негативное влияние ненасыщенной зоны фильтрации, гидравлическая водопроводимость водоносного горизонта, наличие превышений ПДК в подземных водах, количество погибшего планктона, факторы, учитывающие шумовое воздействие, и т. д.

Представляется, что указанный метод может быть использован для рассматриваемого в настоящей статье объекта при учете соответствующих факторов, характерных для конкретных условий, поскольку эти факторы являются основными элементами предлагаемой формулы и представляют собой исчерпывающий перечень природных и технических характеристик, определяющих уровень экологического риска в рассматриваемых условиях.

Предложенный авторами подход к оценке экологического риска с использованием метода разнокачественных показателей, по сути, может быть применен для решения различных инженерно-экологических и технических задач. Так, например, Р. Пэнтл [20, Глава 4, разделы 4.1- 4.2] указывает, что «наиболее желательной формой оценки возможных вариантов решения является скалярное представление системы, и поэтому разнотипные (или разнокачественные) показатели должны быть сведены к единой скалярной величине». Для этого Р. Пэнтл использует формулу, аналогичную использованной авторами [20, С. 50—51], где целевая функция представляется в виде F=W*U, где W — постоянные весовые множители, связанные с u, а u — оценка полезности, связанная со всей системой. Эта же формула используется Р. Пэнтлом для оценки риска применительно к широкому диапазону объектов [20, С. 147—154]. Похожая формула также используется для оценки риска применительно к объектам технической инфраструктуры [21, п. 53.1, раздел 6]. Авторы полагают, что аналогичный подход может быть использован для оценки риска применительно к природно-техническим системам и их отдельным элементам.

Таким образом, расчет экологического риска авторам представляется целесообразным производить, применяя метод разнокачественных показателей [20 (гл. 1, с. 50—51, гл. 4, с. 147—154), 21 (гл. 6, п. 53.1), 22] по следующей формуле:

$$N_i = \lambda_i \cdot \varphi_i, \qquad (1)$$

где N_i — риск наличия утечек из накопителя жидких отходов, в долях единиц;

λ_i — показатель весомости воздействия i-го фактора на достоверность мониторинга определяется экспертным методом, в долях единиц;

φ_i — показатель уровня воздействия i-го фактора на достоверность мониторинга, в долях единиц.

$$\varphi_i = \left(1 - \frac{k_{i\ \max} - k_i}{k_{i\ \max}}\right), \qquad (2)$$

или определяется экспертным методом.

$k_{i\max}$ — максимально возможный уровень воздействия фактора на достоверность мониторинга; k_i _ значение интенсивности воздействия фактора на достоверность мониторинга;

Таблица 2
Шкала изменения уровня риска
Risk level variation scale

Уровень риска	Очень низкий	Низкий	Умерен-ный	Высокий	Очень высокий
Значение уровня риска (N)	0 – 0,20	0,21 – 0,40	0,41 – 0,60	0,61 – 0,80	0,81 – 1,00

$$\begin{cases} 0 < \sum N < 1; \\ 0 < \lambda_i < 1; \\ 0 < \varphi_i < 1; \\ \sum \lambda_i = 1. \end{cases} \quad (3)$$

Для того, чтобы в условиях неопределенности сделать вывод о величине риска наличия утечек из накопителя жидких отходов, авторам представляется возможным использовать следующую шкалу изменения уровня риска (табл. 2) [22].

В качестве факторов, которые влияют на величину вероятности наличия утечек из накопителя жидких отходов, могут быть учтены следующие:

1. Влияние существования техногенного водоносного горизонта на достоверность мониторинга.

2. Разовое ураганное превышение специфических моторных масел в контрольном створе в месте выхода нагорной канавы.

3. Превышение концентраций загрязняющих веществ в подземных водах над фоновыми показателями в 30% случаев.

Значения показателя весомости воздействия i-го фактора на достоверность мониторинга и показателя уровня воздействия i-го фактора на достоверность мониторинга для каждого из факторов представлены в табл. 3. Величина показателя уровня воздействия φ для фактора влияния техногенного водоносного горизонта на достоверность мониторинга, а также значения показателя весомости воздействия i-го фактора на достоверность мониторинга λ были определены экспертным методом (метод Делфи).

Результаты выполненных расчетов представлены ниже.

$$N = (1 - \frac{300 - 1}{300}) \cdot 0,8) \cdot 0,1 + 0,1 \cdot 0,1 =$$

$$= 0,0027 + 0,070 + 0,010 = 0,08.$$

Таблица 3
Значения показателей весомости и показателей уровня воздействия для каждого из факторов
Values of weight indicators and impact level indicators per factors

№ п/п	Наименование фактора	k_{max}, $k_{факт}$ или φ	λ
1	Влияние наличия техногенного водоносного горизонта на достоверность мониторинга.	φ = 0,1	0,1
2	Единоразовое за весь период наблюдений ураганное превышение специфических моторных масел в контрольном створе в месте выхода нагорной канавы.	k_{max} = 300 $k_{факт}$ = 1	0,8
3	Превышение концентраций загрязняющих веществ в подземных водах над фоновыми показателями в 30% случаев	k_{max} = 3360 $k_{факт}$ =1008	0,1

Полученные результаты с учетом разработанной шкалы говорят о том, что риск наличия течи накопителя жидких отходов является очень низким.

На основании вышеизложенного авторы рекомендуют усовершенствовать параметры мониторинга для данного и аналогичных объектов в целях более достоверного определения риска того, что имеются утечки из накопителя. Для этого предлагается:

1. Пробурить скважины на глубину распространения техногенного водоносного горизонта (в нашем случае 5—7 метров).

2. Отбирать пробы по сокращенному (сбалансированному по катионам и анионам) перечню показателей для анализа состава воды.

3. Проводить обследование водонепроницаемого слоя и целостности этого слоя (малая мощность слоя, появление трещин и т. д.) методами неразрушающего контроля и результатов оценки.

4. Проводить поинтервальное обследование качества опробование в накопителя жидких отходов.

5. Ежеквартально замерять уровни подземных вод в скважинах.

6. Ежегодно замерять абсолютную отметку уровеня водной поверхности в накопителе жидких отходов.

Заключение

Обработка и анализ данных мониторинга позволяют с некоторыми допущениями сделать вывод об отсутствии утечек из накопителя жидких отходов. Этот вывод базируется на том, что концентрация маркерного компонента (сульфат-ион) в подземных водах колеблется в диапазоне в среднем от 10 до 150 мг/л за весь период наблюдений, что характерно для подземных вод горноскладчатого Урала в целом.

В то же время, по мнению авторов, утверждать со стопроцентной уверенностью, что утечки из накопителя жидких отходов отсутствуют, нельзя по следующим причинам:

1. В районе размещения накопителя по всей видимости сформировался техногенный водоносный горизонт, находящийся в теле золоотвала. Наблюдательная сеть на этот горизонт отсутствует. При этом существующая наблюдательная сеть, оборудованная на лежащий ниже природный водоносный горизонт, может не зафиксировать загрязнения вод техногенного горизонта в результате утечек из накопителя.

2. Зафиксировано единоразовое за весь период наблюдений ураганное превышение концентрации специфических моторных масел (12 ПДК) в контрольном створе в месте выхода водоотводной канавы, в которую разгружается техногенный водоносный горизонт. При этом имеется информация, что в начальный период эксплуатации накопителя в него, среди прочего, могли сливаться и отработанные моторные масла.

3. По отдельным и различным в различные периоды времени контролируемым в подземных водах веществам в разное время зафиксированы хаотичные разовые превышения фоновых концентраций. В сумме такие случаи составили около 30% за весь период наблюдения. Опыт как отечественных [23], так и зарубежных [10, 24—26] мониторинговых исследований говорит о невозможности создать идеальную сеть мониторинга. Всегда существует вероятность того, что наблюдательные точки не зафиксируют загрязнение по разным причинам, например, из-за неучёта геологических, гидрогеологических или тектонических факторов (наличие слабопроницаемых зон, наличия зон повышенной трещиноватости, наличия интрузий, являющихся фильтрационными барьерами).

В случаях, когда речь идет о накопителях опасных жидких промышленных отходов, не выявленные утечки могут создать серьезную угрозу здоровью людей и состоянию окружающей среды. Для принятия решения о ликвидации такой потенциальной угрозы либо для принятия решений о других действиях управленческого и технического характера необходимо помимо выводов, основанных на данных мониторинга, учитывать и риски некорректности этих выводов. Представляется целесообразным, опираясь на данные мониторинга качества подземных и поверхностных вод, выполнять оценку риска утечек из накопителя жидких опасных отходов с ежеквартальной периодичностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный реестр объектов размещения отходов [сайт]. URL: http://clevereco.ru/groro. Дата обращения 08.05.2021 г.
2. СП 58.13330.2019. Свод правил. Гидротехнические сооружения. Основные положения. СНиП 33—01—2003» (ред. от 16.12.2019)
3. Приказ Минприроды России от 08.12.2020 N 1030 «Об утверждении Порядка проведения собственниками объектов размещения отходов, а также лицами, во владении или в пользовании которых находятся объекты размещения отходов, мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды на территориях объектов размещения отходов и в пределах их воздействия на окружающую среду» (ред. от 08.12.2020)
4. *Р. В. Улитин, О. И. Федорова* Геоэлектрический контроль состояния грунтовых гидротехнических сооружений // Материалы 33-ей сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского. Материалы межд. конф. им. Д. Г. Успенского. (Екатеринбург, 30 января-03 февраля 2006) — Екатеринбург: изд-во ИГФ УрО РАН,2006.– С. 115—119
5. *Прейс В. Ф.* Гидрогеология СССР. Том 14. –Москва: Уралнедра, 1972 г. — 648 С.
6. *Бурлибаев М. Ж.*, *Волчек А. А.*, *Шведовский П. В. Бурлибаева Д. М.* Особенности выбора альтернативных экологических решений в условиях неопределенности // Гидрометеорология и экология, — 2012. — №2.– С. 117—125
7. *Вишняков Я. Д.*, *Радаев Н. Н.* Общая теория рисков / учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. — Москва: Академия, 2008 г. — 368 С.
8. *Галицкая И. В.*, *Позднякова И. А.*, *Батрак Г. И.*, *Томс Л. С.* Подходы к оценке риска загрязнения подземных вод на участках гидрогеологических окон // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. — 2018. — №6.–С. 83—94
9. *Боков В. А.*, *Багрова Л. А.*, *Тихонов А. С.*, *Смирнов В. О.* Оценка экологических опасностей и рисков. Учебное пособие.– Симферополь: Доля, 2012 г. — 143 С.
10. *Rosen L.*, *LeGrand H. E.* An Outline of a Guidance Framework for Assessing Hydrogeological Risks at Early Stages // Ground Water. — 1997. — V. 35, № 2. — P. 195–204
11. *Зекцер В. С.* Подземные воды как компонент окружающей среды. — Москва: Научный мир, 2001 г.– 328 С.
12. *Бакулина М.*В Исследование возможности применения автоматизированной системы для расчета и представления рисков, связанных с ухудшением характеристик подземных вод // Экономика строительства и природопользования. — 2019. — № 3 (72). — С. 65—70
13. *Климчук А. Б.*, *Токарев С. В.* Оценка уязвимости карстовых подземных вод к загрязнению: горно-крымский подход / Карст и пещеры Кавказа: результаты, проблемы и перспективы исследований. Материалы V Региональной научно-практической конференции. — 2014.– С. 177—181
14. *Ерошина Д. М.*, *Ходин В. В.*, *Демидов А. Л.* Факторы экологических рисков от полигонов в республике Беларусь // РУП «Бел НИЦ «Экология». — 2012. — №5 (71). — С. 31—35

15. *В. В. Аникиев, П. В. Захаров* Оценка экологического риска для населения и водных экосистем нефтегазодобывающих регионов России // Геоинформатика. — 2003. — №3. — С. 25—31

16. *Ignatyeva M. N.*, *Yurak V. V.*, *Dushin A. V.*, *Polyanskaya I. G.* Assessing challenges and threats for balanced subsoil use // *Environ Dev Sustainability*. 2021. DOI: 10.1007/s10668—021—01420—1 [In Engl]

17. *Любимова А. В.* и *Спиридонова В. В.* Гис-анализ комплекса природных и техногенных рисков Северо-Кавказского экономического района // Геоинформатика. — 2012. — №3. — С. 1—7

18. *Васильев А. В.* Подходы к оценке экологического риска при воздействии акустических загрязнений // Ecology and industry in Russia. — 2018. –№22. — С. 25—27

19. *Чапарин А. Н.* Алгоритмическое совмещение оценки экологического риска с ГИС // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2010. — №6. — С. 101—103

20. *Пэнтл Р.* Методы системного анализа окружающей среды / пер. с англ. Н. Н. Моисеев. — М. : Мир, 1979. — 213 С.

21. Приказ Минпромторга России от 21.07.2017 N 2380 «О Методических рекомендациях по разработке и подготовке к принятию проектов технических регламентов»

22. *Khokhryakov A. V.*, *Fadeichev A. F.*, *Tseytlin E. M.* Description of Environmental Issues of Mining Enterprises Basing in Integral Environmental Hazard Index // Inzynieria Mineralna. Journal of the Polish Mineral Engineering Society. — 2014. — №1 (33). — P..283—285

23. *Мироненко В. А.*, *Румынин В. Г.* Проблемы гидрогеоэкологии. Том 3. Книга 1. Прикладные исследования — Москва: Издательство Московского государственного горного университета, 2002 г. — 312 С.

24. *U. S. Congress, Office of Technology Asessment, Coming Clean Super Fund's Problems Can Be Solved // Washington DC U. S. Government Printing Office. — 1989. – 228 p.*

25. *James E.* Woolford National Strategy to Expand Superfund Optimization Practices from Site Assessment to Site Completion // Memorandum. –2012 .– 14 p.

26. Analyst in Environmental Policy Superfund: Implementation and Selected Issues // Congressional Research Service. –2007. — 21 p. ГИАБ

REFERENCES

1. *Gosudarstvennyj reestr ob"ektov razmeshcheniya othodov* [State register of waste disposal facilities], available at: http://clevereco.ru/groro (accessed 08.05.2021)

2. *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya. Osnovnye polozheniya. SP 58.13330.2019. Svod pravil, SNiP 33—01—2003* [Hydraulic structures. Basic provisions] Set of rules of the Russian Federation no. 58.13330.2019, Moscow, 2019. [In Russ].

3. *O Poryadke provedeniya sobstvennikami obeyktov razmeshcheniya othodov, a takzhe licami, vo vladenii ili v polzovanii kotoryh nahodyatsya obeykty razmeshcheniya othodov, monitoringa sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchej sredy na territoriyah obeyktov razmeshcheniya othodov i v predelah ih vozdejstviya na okruzhayushchuyu sredu. Prikaz Minprirody Rossii ot 08.12.2020. no.1030* [Environmental monitoring of waste disposal facilities]. Order of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Russian Federation of 08.12.2020 no. 1030, Moscow, 2020. [In Russ].

4. Ulitin R. V., Fedorova O. I. S [Geoelectric monitoring of the state of soil hydraulic structures] *Geoelektricheskij kontrol' sostoyaniya gruntovyh gidrotekhnicheskih sooruzhenij*. Materialy 33-ej sessii Mezhdunarodnogo seminara im. D. G. Uspenskogo. Materialy mezhd. konf. im. D. G. Uspenskogo, 2006, pp. 115—119. [In Russ].

5. Preis V. F. *Gidrogeologiya SSSR. Tom 14.* Ural [Gidrogeology USSR], Moscow, Nedra, 1972, attachment 3,p.p. 596 — 641. [In Russ]

6. Burlibaev M. G., Volchek A. A., Shvedovskiy P. V., Burlibaeva D. M. Features of the choice of alternative environmental solutions in conditions of uncertainty. *Hydrometeorology and Ecology*. 2011. No2, pp. 117 — 125 [In Russ]

7. Vishnyakov Ja.D., Radaev N. N. *Obshchaya teoriya riskov* [General risk theory], Moscow. Academy, 2008. 368 p. [In Russ]

8. Galitskaya I. V., Posdnyakova I. A., Batrak G. I., Toms L. S. Approaches to assessment of groundwater contamination risk at the sites of hydrogeological windows. *Geoekologiya. Inzheneraya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*.2018. No6, pp. 83 — 94 [In Russ]

9. Bokov V. A., Bagrova L. A., Tihonov A. S., Smirnov V. O.. *Otsenka ekologicheskih opasnostey i riskov* [Assessment of environmental hazards and risks], Simferopol. Dolya, 2012. 143 p. [In Russ]

10. Rosen L., LeGrand H. E. An Outline of a Guidance Framework for Assessing Hydrogeological Risks at Early Stages, Ground Water. 1997. V. 35. no 2., pp. 195–204

11. Zektser V. S. *Podzemnyie vodyi kak komponent okruzhayuschey sredyi* [Groundwater as a component of the environment], Moscow. Scientific world, 2001. 328 p. [In Russ]

12. Bakulina M. V. Research on the possibility of automated system application for the calculation and presentation of the risks relating to the decrease of groundwater characteristics. *Economics of construction and environmental management.* 2019. No3 (72), pp. 65 — 70

13. Klimchuk A. B., Tokarev S. V. [Assessment of vulnerability of karst groundwater to pollution: the Mountaineous Crimea approach] *Otsenka uyazvimosti karstovyih podzemnyih vod k zagryazneniyu: gorno-kryimskiy podhod.* Materialyi V Regionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 2014, pp. 177 — 181[In Russ].

14. Eroshina D. M., Hodin V. V., Demidov A. L. Assessment of the vulnerability of karst groundwater to pollution: the Crimean mountain approach. RUE Bel Research Center Ecology. 2012. No5(71), pp.31 — 35 [In Russ].

15. Anekiev V. V., Zaharov P. V. Assessment of environmental risk for the population and aquatic ecosystems of oil and gas producing regions of Russia. *Geoinformatics*. 2003, no.3, pp. 25 — 31 [In Russ].

16. Ignatyeva M. N., Yurak V. V., Dushin A. V., Polyanskaya I. G. Assessing challenges and threats for balanced subsoil use. *Environ Dev Sustainability*. 2021. DOI: 10.1007/s10668 — 021 — 01420 — 1 [In Engl]

17. Lubimova A. V., Spiridonova V. V. Gis-analysis of a complex of natural and man-made risks of the North Caucasian economic region. *Geoinformatics*. 2012, No3, pp. 1 — 7 [In Russ].

18. Vasil'ev A. V. Approaches to assessing environmental risk when exposed to acoustic pollution. *Ecology and industry in Russia*, 2018, No22, pp. 25 — 27 [In Russ].

19. Chaparin A. N. Algorithmic combination of 'ecological risk assessment with GIS. Proceedings of higher educational institutions. *Geodesy and aerial photography*, 2010, No6, pp. 101 — 103 [In Russ].

20. Pantl R. Methods of system analysis of the environment. translate from English N. N. Moiseev Moscow.: Peace, 1979. 213 p.

21. *O Metodicheskih rekomendaciyah po razrabotke i podgotovke k prinyatiyu proektov tekhnicheskih reglamentov. Prikaz Minpromtorga Rossii ot 21.07.2017 no.2380* [On Methodological Recommendations for the Development and Preparation for Adoption of Draft Technical Regulations]. Order of the Ministry of of Industry and Trade of the Russian Federation of 21.10.2017 no. 2380, Moscow, 2017. [In Russ].

22. Khokhryakov A. V., Fadeichev A. F., Tseytlin E. M. Description of Environmental Issues of Mining Enterprises Basing in Integral Environmental Hazard Index. Inzynieria

Mineralna. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 2014, No1(33), pp.283—285 [In Russ].

23. Vishnyakov Ja.D., Radaev N. N. *Problemyi gidrogeoekologii* [Problems of gidrogeoecology], Moscow. Moscow mining university, 2002. 312 p. [In Russ].

24. U. S. Congress, Office of Technology Asessment, Coming Clean Super Fund's Problems Can Be Solved. Washington DC U. S. Government Printing Office. 1989. 228 p.

25. James E. Woolford National Strategy to Expand Superfund Optimization Practices from Site Assessment to Site Completion. Memorandum. 2012. 14 p.

26. Analyst in Environmental Policy Superfund: Implementation and Selected Issues. Congressional Research Service. 2007. 21 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хохряков Александр Владимирович[1] — докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной экологии, e-mail: avx09@mail.ru;
Рыбников Петр Андреевич[1,2] — канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры инженерной экологии, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании, e-mail: ribnikoff@yandex.ru;
Цейтлин Евгений Михайлович[1] — канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры инженерной экологии, e-mail: tseitlin.e.m@gmail.com;
Коновалов Игорь Владимирович[1] — ст. преподаватель кафедры инженерной экологии, e-mail: igor-nay@yandex.ru;
[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия;
[2] Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Khokhryakov A. V.[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Environmental Engineering Department, e-mail: avx09@mail.ru;
Rybnikov P. A.[1,2], Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Associate Professor at the Environmental Engineering Department, Leading Researcher, Head of Laboratory of Digital Geoinformation Technologies in Subsoil Management, e-mail: ribnikoff@yandex.ru;
Tseytlin E. M.[1], Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Associate Professor at the Environmental Engineering Department, e-mail: tseitlin.e.m@gmail.com;
Konovalov I. V.[1], Senior Lecturer at the Environmental Engineering Department, e-mail: igor-nay@yandex.ru;
[1] Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia;
[2] Institute of Mining Ural Branch Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 25.05.2021; получена после рецензии 15.07.2021; принята к печати 10.10.2021.
Received by the editors 25.05.2021; received after the review 15.07.2021; accepted for printing 10.10.2021.