

УДК 504.(470.5)

**Рыбникова Людмила Сергеевна**

доктор геолого-минералогических наук,  
главный научный сотрудник,  
лаборатория экологии горного производства,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [luserib@mail.ru](mailto:luserib@mail.ru).

**Наволокина Вера Юрьевна**

младший научный сотрудник,  
лаборатория геоинформационных  
и цифровых технологий в недропользовании,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [pigmalion999@rambler.ru](mailto:pigmalion999@rambler.ru)

### ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ГИДРОСФЕРЫ В ВЕРХОВЬЯХ БАСЕЙНА РЕКИ ТАГИЛ (СВЕРДЛОВСКАЯ ОБЛ.)\*

#### Аннотация:

В настоящее время актуальной экологической проблемой глобального масштаба является образование и сброс шахтных вод, содержащих повышенные концентрации загрязняющих веществ. Одной из наиболее загрязненных рек Свердловской области является река Тагил.

Установлено, что в верхнем течении реки Тагил, где практически нет антропогенной нагрузки, содержания меди, железа, алюминия в 4 – 7 раз выше предельно допустимых концентраций (ПДК) для водоемов рыбохозяйственного значения. В среднем и особенно в нижнем течении экологическое состояние реки существенно ухудшается, в том числе за счет закрытых и затопленных медноколчеданных рудников. Несмотря на достаточно высокую степень очистки шахтных вод, основные компоненты, загрязняющие реку, превышают ПДК для железа, меди и цинка в десятки и сотни раз. Основными причинами загрязнения водных объектов являются низкие темпы самореставрации гидросферы после завершения отработки месторождений, и ненормативная работа очистных сооружений, без полной модернизации которых проблемы неудовлетворительного состояния гидросферы невозможно решить.

*Ключевые слова:* гидросфера, медноколчеданное месторождение, загрязняющие вещества, бассейн реки Тагил.

DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.081

**Rybnikova Liudmila S.,**

Doctor of Geology and Mineralogy,  
Chief Researcher,  
Laboratory of mining ecology,  
Institute of Mining,  
Ural Branch of RAS,  
620075 Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [luserib@mail.ru](mailto:luserib@mail.ru).

**Navolokina Vera Yu.**

Junior Researcher,  
Laboratory of information and  
digital technologies in subsoil use,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [pigmalion999@rambler.ru](mailto:pigmalion999@rambler.ru)

### ASSESSMENT OF THE HYDROSPHERE STATE OF THE UPPER REACHES OF THE TAGIL RIVER BASIN (SVERDLOVSK REGION)

#### Abstract:

Currently, an urgent environmental problem of a global scale is the formation and discharge of mine water containing elevated concentrations of pollutants. One of the most polluted rivers in the Sverdlovsk region is Tagil river.

It is established that in the upper reaches of the river Tagil, where there is practically no anthropogenic load, the content of copper, iron, aluminum is 4-7 times higher than the maximum permissible concentration for fishery reservoirs. In the middle, and especially in the lower reaches, the ecological condition of the river is significantly deteriorating, including due to closed and flooded copper pyrites mines. Despite a fairly high degree of purification of mine water, the main components polluting the river exceed the MPC for iron, copper and zinc by tens and hundreds of times. The main causes of pollution of water bodies are the low rate of self-rehabilitation of the hydrosphere after completion of field development and the abnormal operation of treatment facilities, without complete modernization of which the problems of the unsatisfactory state of the hydrosphere cannot be solved.

*Keywords:* hydrosphere, pollutant, flooding, abandoned mine, Tagil river.

#### Введение

Одной из главных причин загрязнения водных объектов является сброс неочищенных или недостаточно очищенных сточных вод. Реки, протекающие по территориям с развитой горнодобывающей и перерабатывающей промышленностью, испытывают заметную техногенную нагрузку.

\* Исследования выполнены в рамках Программы фундаментальных научных исследований РАН, тема 0405-2019-0005 и 0328-2019-005

В настоящее время актуальной экологической проблемой глобального масштаба является образование и сброс шахтных вод, содержащих повышенные концентрации загрязняющих веществ. В результате закрытия и затопления рудников кислые шахтные воды привели к деградации нескольких сотен тысяч километров рек по всему миру, в первую очередь в США, Испании, Германии, Китае и России. Например, в США кислые шахтные воды оказывают негативное влияние на более чем 22 тыс. км рек и 729 млн м<sup>2</sup> пресноводных резервуаров [1].

Данная проблема также актуальна и для России, в том числе для территории Уральского региона. Согласно данным государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2018 году» суммарный сброс шахтных и коллекторно-дренажных вод в поверхностные водные объекты составляет более 700 млн м<sup>3</sup>, из них загрязненных сточных вод около 80 % [2]. Основными загрязняющими веществами в реках Свердловской области являются соединения меди, марганца, цинка, железа, взвешенные вещества, азот аммония и азот нитритов, сульфаты, фенолы.

Целью данной работы является оценка состояния гидросферы верховьев бассейна реки Тагил (Свердловская область) и выявление причин ее загрязнения. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: проведен отбор проб воды для определения соответствия ее качества установленным нормативным требованиям при сбросе сточных вод в водный объект; произведена идентификация источников загрязнений; выполнен сбор исторической и статистической информации; построены карты-схемы с концентрациями загрязняющих веществ; проведена оценка изменения качества поверхностных вод в верховьях реки Тагил.

#### Материалы и методы

Река Тагил – крупная река Свердловской области, берет начало на восточном склоне Среднего Урала, южнее г. Верхний Тагил, в хребте Красные горы (рис. 1). Течение реки преимущественно северо-восточное, впадает в реку Туру (Тобол-Иртыш, Иртышский бассейновый округ). Длина реки Тагил составляет 414 км, площадь водосбора – 10,1 тыс. км<sup>2</sup>.

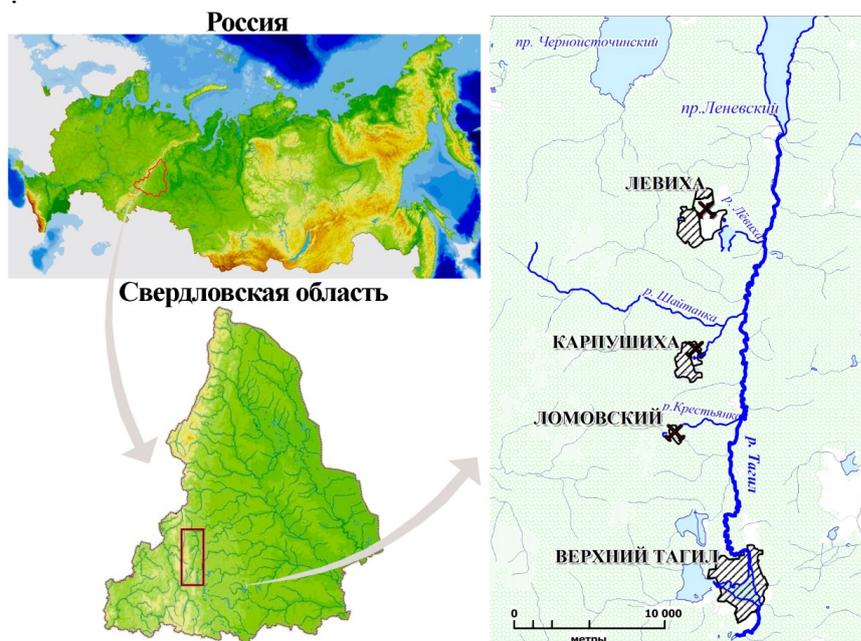


Рис. 1 – Схема расположения объекта (верховья реки Тагил)

Для анализа степени загрязненности реки Тагил использовались два вида информации, которые позволили дать оценку величины загрязнения водного объекта на всем участке исследования.

Основной массив информации представлен данными регулярных (начиная с 2007 г.) наблюдений за составом шахтных вод в районе затопленных Ломовского, Карпушихинского, Левихинского медноколчеданных рудников. Организацией, производящей нейтрализацию шахтных вод, контролируется состав воды в техногенных водоемах, в прудах-осветлителях, в сбросных каналах, выше и ниже места сброса в поверхностные водотоки [3]. Ежедневно определяются наиболее характерные для кислых шахтных вод показатели загрязнения: pH, микрокомпоненты ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{As}^{2+}$ ),  $\text{Cl}^-$ , минерализация, взвешенные вещества, нефтепродукты.

Все анализы выполнены в испытательной химической лаборатории филиала ГКУСО «УралМонацит», п. Карпушиха. Для определения содержания компонентов в воде используются потенциометрический, фотометрический, гравиметрический методы.

Дополнительно проведено опробование по всему течению реки Тагил, начиная со створа, в качестве которого был выбран участок, находящийся выше г. Верхний Тагил, ниже истока реки, для определения фоновых концентраций. Далее опробование проводилось на каждом участке реки, где вблизи расположены закрытые отработанные рудники, пробы отбирались как минимум в двух створах, один из которых располагался выше (условный фоновый створ), другой – ниже сбросов очищенных сточных вод ликвидируемых шахт (контрольные створы). Расположение створов показано на рис. 2.

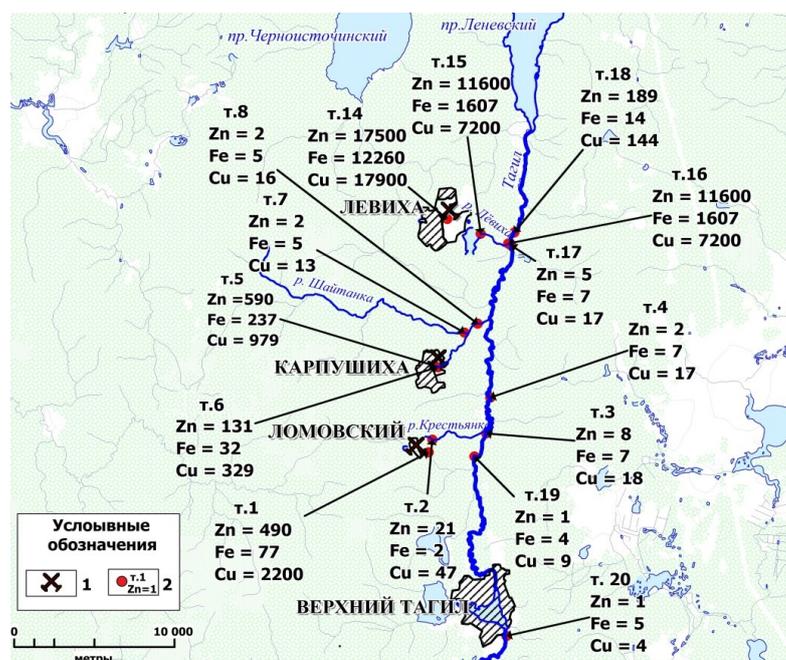


Рис. 2 – Карта-схема верховьев бассейна реки Тагил.

Условные обозначения:

1 – отработанные рудники, 2 – точки опробования, сверху номер, справа компонент и кратность превышения ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения

Пробы отбирались в соответствии с ГОСТ 31861-2012 «Вода. Общие требования к отбору проб». Анализы выполнены в аналитическом сертификационном испытательном центре ФГБУН Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН. Определение содержания микро- и макрокомпонентов в воде проводилось атомно-эмиссионными и масс-спектральными методами с индуктивно связанной плазмой. Анализ экологического состояния поверхностных водных объектов проводился с помощью сравнения полученных данных о содержании компонентов с предельно допустимыми концентрациями для водоемов рыбохозяйственного значения (далее – ПДК<sub>рх</sub>) [4].

### Результаты и обсуждение

При анализе изменений показателей химического состава воды по течению реки Тагил были выявлены следующие закономерности. В верховьях реки фоновые концентрации компонентов заметно превышены для меди (в 4 раза), алюминия (в 7 раз), железа (в 5 раз) (табл.1). Превышения по фоновым концентрациям характерны для многих рек Свердловской области, так в реке Туре зафиксированы превышения ПДК по фоновым концентрациям для марганца в 3 раза, железа – в 6 раз [5]. Присутствие металлов в речной воде определяется влиянием таких факторов природного характера, как атмосферные осадки, горные породы, подземные воды, температурный режим и рельеф. В результате природного загрязнения в реке Тагил превышение по ряду компонентов фиксируется уже в верховьях, а так как река имеет небольшие уклоны и течет сравнительно медленно, то это приводит к формированию загрязненных вод на всем участке реки г. Верхний Тагил – г. Нижний Тагил [6].

Таблица 1

Содержание компонентов реки Тагил на участке г. Верхний Тагил – Ленеvский пруд (опробование 02.10.2019)

Место отбора проб	Содержание компонентов, мг/л								
	SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Fe <sub>общ</sub>	Mn <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	V <sub>общ</sub>	Ni <sup>2+</sup>	Co <sup>2+</sup>
	ПДК <sub>рх</sub>								
	100	0,001	0,01	0,1	0,1	0,04	0,001	0,01	0,01
г.20 фон р.Тагил	18	0,004 (4)	0,01	0,5 (5)	0,03	0,29 (7)	0,001	0,03 (3)	<ПО
г.19 р.Тагил, ниже г. Верхний Тагил	38	0,009 (9)	0,01	0,4 (4)	0,1	0,15 (4)	0,002 (2)	0,01	<ПО
г.3 р. Тагил, выше сброса	43	0,018 (18)	0,08 (8)	0,7 (7)	0,1	-	-	-	-
г.4 р. Тагил, ниже сброса	38	0,017 (17)	0,02 (2)	0,7 (7)	0,1	-	-	-	-
г.17 р. Тагил, выше сброса	35	0,02 (20)	0,05 (5)	0,7 (7)	0,1	0,14 (4)	0,001	0,02 (2)	<ПО
г.18 р. Тагил, ниже сброса	146 (2)	0,14 (140)	1,89 (189)	1,4 (14)	1,2 (12)	1,86 (47)	0,001	0,02 (2)	0,01

Далее концентрации загрязняющих веществ по течению реки значительно увеличиваются вплоть до Ленеvского водохранилища (см. рис. 2). Кратность превышения ПДК по меди увеличивается до 8, по железу – до 4 (см. табл. 1). Это объясняется тем, что в верховьях реки построена Верхнетагильская ГРЭС, которая сбрасывает недостаточно очищенные сточные воды. Также в рассматриваемом районе реки Тагил расположено несколько отработанных рудников. После впадения в реку Тагил рек Крестьянка, Шайтанка с очищенными сточными водами от ликвидированных медноколчеданных рудников кратность превышения ПДК возрастает до 18 раз для меди, до 8 – для железа и цинка. Причиной этого являются затопленные медноколчеданные рудники, на которых формируются техногенные водоемы с кислыми шахтными водами специфического состава (табл. 2).

Таблица 2

**Состав шахтных вод в техногенных водоемах  
на затопленных медноколчеданных рудниках (2019 г.)**

Объект	Химический состав шахтных вод
Ломовский рудник	$M_{1,18} \frac{SO_4 100}{Fe 43 Mn 24 Zn 23 Cu 10} pH_{3,58}$
Карпушихинский рудник	$M_{0,7} \frac{SO_4 100}{Fe 77 Zn 16 Mn 4 Cu 3} pH_{3,64}$
Левихинский рудник	$M_{12,5} \frac{SO_4 100}{Fe 85 Zn 10 Mn 4 Cu 1} pH_{3,62}$

В настоящее время состав шахтных вод на рудниках сульфатный, гидрокарбонат-ион отсутствует; среди катионов преобладают железо, цинк, марганец и медь. Минерализация на всех участках различается, но pH близок к 4. При попадании кислых шахтных вод в естественные водотоки, при повышении pH  $Fe^{2+}$  переходит в  $Fe^{3+}$ , эта реакция приводит к образованию гидроокислов железа и алюминия с высоким содержанием микроэлементов.

Для снижения экологической нагрузки на гидросферу и предотвращения поступлений неочищенных кислых вод в водотоки на рассматриваемых затопленных медноколчеданных рудниках шахтные воды обрабатывают на станциях нейтрализации с применением в качестве реагента гашеной извести ( $CaCO_3$ ) [7]. После отстаивания в прудах-осветлителях при перетекании в сбросной канал вода также дополнительно нейтрализуется известью. В результате нейтрализации значительное количество компонентов осаждается, однако часть веществ попадает в реку (рис. 3). Это объясняется тем, что необходимо очищать достаточно большой объем воды, который не успевает полностью нейтрализоваться.

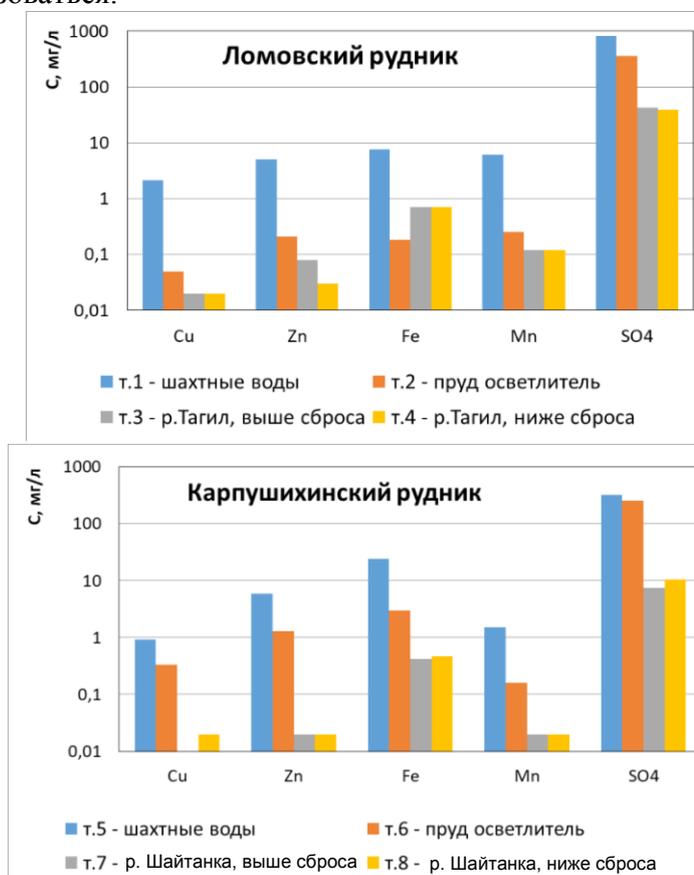


Рис. 3 – Изменение содержания компонентов в водных объектах в районе Ломовского и Карпушихинского рудников (средние значения за 2019 г.)

Средние концентрации в шахтных водах Ломовского и Карпушихинского рудников составляют для меди – 2,16 и 0,92; марганца – 6,19 и 1,5; цинка – 5,0 и 5,9; железа – 7,7 и 3,0 мг/дм<sup>3</sup>. Концентрации в прудах-осветлителях значительно уменьшаются и составляют для меди – 0,1 и 0,3; марганца – 0,2; цинка – 0,2 и 1,3; железа – 0,2 и 3,0 мг/дм<sup>3</sup>. В результате применяемого метода очистки содержание компонентов, поступающих в реку Тагил, снижается в десятки и даже сотни раз и составляет для меди – 0,02; марганца – 0,12 и 0,02; цинка – 0,03; железа – 0,7 и 0,5 мг/дм<sup>3</sup>.

Таким образом, анализ состава вод на рассматриваемых рудниках показывает, что эффективность применяемого метода очистки на Ломовском руднике составляет 95 – 98 % для цинка, марганца, меди и железа. На Карпушихинском руднике степень очистки составляет 90 % для марганца, 65 %, 78 %, 88 %, соответственно, для меди, цинка и железа. Это позволяет значительно понизить концентрацию загрязняющих веществ, сбрасываемых в реку Тагил.

Наиболее значимым загрязнителем реки Тагил является река Левиха. Это хорошо видно на космоснимках: цвет воды в реке Тагил изменяется после впадения в нее реки Левиха (рис. 4).



Рис. 4 – Место впадения реки Левиха в реку Тагил  
 1 – река Тагил до впадения реки Левиха; 2 – сбросной канал (русло реки Левиха);  
 3 – река Тагил после впадения реки Левиха; 4 – пруд-осветлитель

На Левихинском медноколчеданном руднике, так же как и на других закрытых и затопленных рудниках, как при отработке, так и после ее завершения формируются кислые воды с низкими значениями рН, высоким содержанием железа, меди, цинка, сульфатов и других веществ (табл. 3).

Таблица 3

Содержание компонентов в шахтных водах на Левихинском руднике во время отработки и после затопления

Показатели	Содержание компонентов, мг/л (кроме рН)						
	рН	Медь	Цинк	Железо	Сухой остаток	Сульфаты	Марганец
	ПДК рх [4]						
	6,5-8,5	0,001	0,01	0,1	-	100	0,01
Среднее в период отработки	2,35	15,4	317	730	11 600	5970	110
Среднее за 2009 г.	3,77	17,9	1 147	3 667	39 847	17 925	307
Среднее за 2014 г.	3,74	16,5	419	2 218	19 883	14 255	120
Среднее за 2019 г.	3,62	17,5	176	1 222	12 478	6 896	65
Среднее за 2007–2019 гг.	3,76	17,9	482	2 097	21 185	10 561	130

Несмотря на то что отработка рудника закончилась в 2003 г., а затопление – в 2007 г., на территории рудника по-прежнему формируются кислые шахтные воды. Содержание цинка и железа в шахтных водах, по сравнению с периодом отработки, увеличилось в 2 – 3 раза. Ликвидация и затопление медноколчеданных рудников не предотвращает образование кислых шахтных вод, при этом процесс самоочистки идет очень медленно. Несмотря на то что за 10 лет содержание марганца, железа, цинка уменьшилось в 2, 3, 7 раз, соответственно, их значения по-прежнему значительно превышают ПДК.

Для предотвращения загрязнения гидросферы и окружающей среды кислые шахтные воды нейтрализуются гашеной известью. Данный метод применяется в связи с простотой технологии, доступностью и дешевизной реагентов, он позволяет снизить содержание компонентов в шахтных водах (рис. 5).

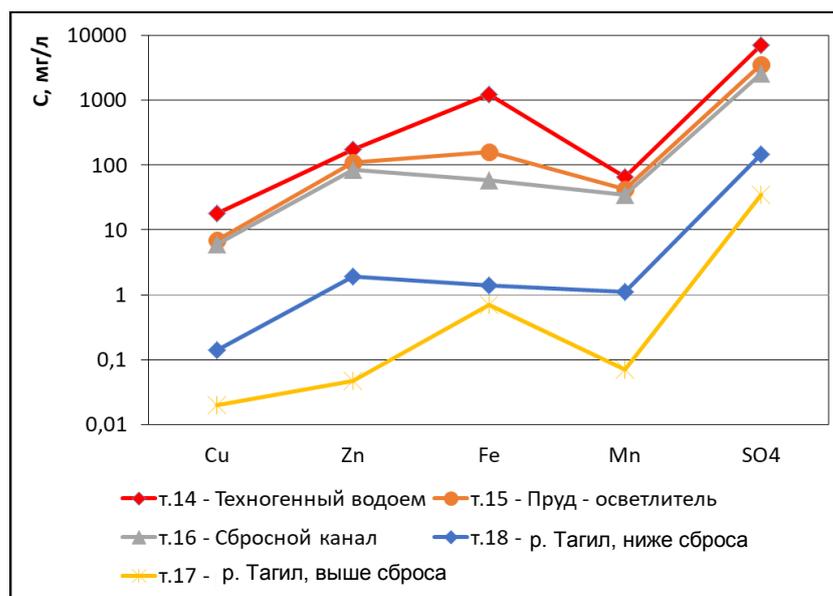


Рис. 5 – Изменение содержания компонентов в водных объектах в районе Левихинского рудника (средние значения за 2019 г.)

Так, после очистки кислых шахтных вод на Левихинском руднике содержание цинка и марганца уменьшается в 2 раза, меди – в 3 раза (см. рис. 5). Однако значительный объем сточных вод и повышенные значения компонентов в них приводят к тому, что после сброса очищенных шахтных вод содержание металлов в воде реки увеличивается в 2 – 40 раз, сульфатов – в 4 раза. Такое положение объясняется не только повышенным содержанием этих компонентов в шахтных водах затопленного рудника. Немаловажное значение имеют такие факторы, как несовершенство очистки и накопление в прудах-осветлителях компонентов, которые сбрасываются с очищенными водами.

По сравнению с Ломовским и Карупшихинским рудниками на Левихинском руднике используемый метод нейтрализации не обеспечивает приемлемую степень очистки для всех компонентов, кроме железа – 87 %, по остальным компонентам степень очистки ниже 60 %. Такая низкая эффективность очистки объясняется тем, что исходные концентрации в шахтных водах Левихинского рудника гораздо выше (по цинку и железу в 35 и 159 раз), чем содержание этих компонентов в шахтных водах Ломовского рудника. Также высокие показатели загрязнения реки Тагил и низкая эффективность очистки определяются тем, что длина русла реки Левиха от места сброса очищенных шахтных вод из пруда-отстойника до ее устья составляет всего 2 км, причем в нижней части русло реки было спрямлено (см. рис. 4), в результате чего вода после отстаивания в пруду-осветлителе протекает достаточно быстро, без препятствий

попадает в реку Тагил, при этом не успевая в полной мере вступить во взаимодействие с щелочными реагентами во время повторной нейтрализации. На Ломовском и Карпушихинском рудниках длина пути после сброса очищенных шахтных вод составляет 3,5 км, русла рек Крестьянки и Шайтанки умеренно извилистые, в результате этого вода течет медленно, что приводит к достаточному взаимодействию с применяемыми щелочными реагентами. Выполненный анализ показывает, что Левихинский медноколчеданный рудник является одним из главных источников загрязнения реки Тагил.

Обобщая вышеуказанные выводы о степени загрязненности воды исследуемой реки микрокомпонентами, нужно отметить, что наибольшую опасность для человека представляют соединения металлов группы Fe, Mn, Al, Cu, Zn, загрязнение речного бассейна которыми имеет устойчивый характер, что свидетельствует о необходимости разработки и принятия мер по решению данной экологической проблемы.

Основными причинами загрязнения реки Тагил являются природные (природное загрязнение), техногенно–индуцированные (формирование кислых шахтных вод после отработки) и технологические (несовершенство очистки) факторы. Река Тагил не обладает способностью к саморегуляции в условиях природного загрязнения и антропогенного воздействия, имеет сравнительно малую скорость течения, испытывает воздействие сброса недостаточно очищенных шахтных вод, в результате химический состав воды характеризуется 4-м классом – "грязные" воды.

Одна из основных причин загрязнения водных объектов – ненормативная работа очистных сооружений. Это объясняется тем, что примерно из девяти тысяч действующих на сегодняшний день очистных сооружений населенных пунктов в России более 70 % было построено 30 – 50 лет назад [8]. Из них примерно 80 % требуют модернизации, остальные не подлежат восстановлению и должны быть реконструированы.

#### *Заключение*

Главным источником загрязнения верховьев реки Тагил являются обогащенные металлами очищенные сточные воды, которые образуются на территории ликвидированных медноколчеданных рудников. Хотя степень очистки шахтных вод составляет 50 – 96 % (для меди, цинка, железа, соответственно), их содержание значительно превышает нормативные требования. В результате этого гидросфера реки Тагил подвергается техногенной трансформации, которая проявляется в изменении химического состава водного объекта: по сравнению с фоновыми значениями концентрации меди увеличиваются в 35 раз, цинка – в 189 раз. Наиболее высокие концентрации загрязняющих веществ в воде приурочены к участку реки Тагил после впадения реки Левиха, сток которой формируется на территории отработанного Левихинского медноколчеданного рудника. Анализ состояния гидросферы реки Тагил свидетельствует о том, что основными причинами загрязнения водных объектов являются низкие темпы самореабилитации гидросферы после завершения отработки месторождений и ненормативная работа очистных сооружений. Без их полной модернизации проблемы неудовлетворительного состояния гидросферы невозможно решить.

#### **Литература**

1. Tuffnell S. Acid drainage: the global environmental crisis you've never heard of / S. Tuffnell - United Kingdom, 2017.
2. О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2018 году : государственный доклад. – Екатеринбург : ООО «Издательство УМЦ УПИ», 2019. - 309 с.
3. Рыбникова Л. С. Оценка влияния затопленного Левихинского медноколчеданного рудника на качество поверхностных вод реки Тагил / Л.С. Рыбникова, П.А. Рыбников, В.Ю. Наволокина. - DOI: 10.25635/2313-1586.2019.03.155 // Проблемы недропользования. - 2019 - № 3 (22). - С. 155 - 161.

4. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : утверждены приказом Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 года № 552 с изм. на 12 октября 2018 года. – Москва : Изд-во ВНИРО, 2011. – 257 с.
5. Экосистема реки Туры в XXI веке. Часть I. Ретроспектива / Л. В. Михайлова, А. К. Матковский, Е. А. Исаченко-Боме, А. И. Коваленко, Н. С. Князева [и др.] // Вестник рыбохозяйственной науки. – 2016. - Т. 3. - № 3 (11). - С. 34 - 54.
6. Ежегодник качества поверхностных вод РФ за 2018 год : информационно-аналитические материалы по результатам мониторинга загрязнения окружающей среды / сост. М. М. Трофимчук. – Росгидромет, Ростов – на – Дону, 2019. – 561 с.
7. Рыбникова Л. С. Закономерности формирования качества подземных вод на отработанных медноколчеданных рудниках Левихинского рудного поля (Средний Урал, Россия) / Л. С. Рыбникова, П. А. Рыбников. - DOI: 10.31857/S0016-7525643282-299 // Геохимия. - 2019. - Т. 64. - № 3. - С. 282 - 299 = (L.S. Rybnikova and P.A. Rybnikov. Regularities in the Evolution of Groundwater Quality at Abandoned Copper Sulfide Mines at the Levikha Ore Field, Central Urals, Russia. *Geochemistry International*, 2019, Vol. 57, No. 3, pp. 298–313).
8. Минприроды назвало самые загрязненные водоемы страны / Научно-практический портал «Экология производства» - 2017. - URL: <https://www.ecoindustry.ru/news/view/52065.html> (дата обращения: 19.05.2020).