

Гидрохимические показатели качества воды Норило-Пясинской озерно-речной системы после разлива дизельного топлива на ТЭЦ-3 г. Норильска в 2020 г.

Д. М. БЕЗМАТЕРНЫХ¹, А. В. ПУЗАНОВ¹, А. В. КОТОВЩИКОВ¹, А. В. ДРОБОТОВ², А. П. ТОЛОМЕЕВ^{2, 3}

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН
656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1
E-mail: bezmater@iwer.ru

²Институт биофизики ФИЦ «Красноярский научный центр
Сибирского отделения Российской Академии наук»
660036, Красноярск, Академгородок, 50/50

³Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

Статья поступила 05.02.2021

После доработки 16.02.2021

Принята к печати 17.02.2021

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты гидрохимического анализа последствий аварийного попадания дизельного топлива в Норило-Пясинскую водную систему. Выявлено загрязнение водотоков водосборного бассейна оз. Пясино (ручей Безымянный/Надеждинский, реки Далдыкан, Амбарная) нефтепродуктами, фенолами, трудно- и легкоокисляемыми органическими веществами (по показателям ХПК, ПО и БПК₅), взвешенными веществами, неорганическими солями и тяжелыми металлами выше фоновых значений и ПДК_{рыб.-хоз.}. Зафиксирована термофикация вод Безымянного ручья в районе ТЭЦ-3. Загрязненность поверхностных вод уменьшается вниз по течению в ряду: ручей Безымянный – р. Далдыкан – р. Амбарная. Присутствие в поверхностных водах нефтепродуктов, фенолов и органических веществ через два месяца после разлива топлива, очевидно, связано с их диффузией из речных донных осадков, где произошло значительное накопление тяжелых фракций дизельного топлива после аварии. Повышенное содержание Са, Си, Zn, Mn, Со и Ni в воде исследованных притоков оз. Пясино непосредственно с аварией не связано, а является результатом общего техногенного загрязнения территории и повышенного геохимического фона по данным элементам. Загрязнения воды нефтепродуктами и фенолами исследованных участков оз. Пясино (центральная и северная части) и р. Пясино не выявлено, однако обнаружены повышенные концентрации Рb (превышающие ПДК_{рыб.-хоз.}) и присутствие Cd, что, вероятно, связано с накопленным загрязнением в предыдущие годы.

Ключевые слова: гидрохимия, качество воды, р. Пясино, оз. Пясино, Норильск, дизельное топливо.

В районе Норильска 29 мая 2020 г. из одного из резервуаров на территории ТЭЦ-3 произошла утечка около 21 тыс. т дизельного топлива, которое затем попало в окружающую

© Безматерных Д. М., Пузанов А. В., Котовщиков А. В., Дроботов А. В., Толмеев А. П., 2021

среду – в почву и ряд водотоков Норило-Пясинской водной системы. Распространение загрязнения шло по руч. Безымянный (Надеждинский), реками Далдыкан, Амбарной и далее в оз. Пясино. Локализацию и устранение последствий разлива топлива на р. Амбарной проводили с использованием каскадных боновых заграждений с последующим сбором, откачкой и утилизацией водно-топливной смеси.

В начале августа 2020 г. в рамках Большой норильской экспедиции (БНЭ) Сибирского отделения Российской академии наук (СО РАН) сотрудниками научных институтов, находящимися под научно-методическим руководством СО РАН, был проведен комплекс полевых работ, в том числе по оценке гидрохимических показателей качества подвергшихся загрязнению и фоновых участков Норило-Пясинской системы. Целью гидрохимических исследований было установление современного экологического состояния оз. Пясино и связанных с ним водотоков, а также влияние аварии на норильской ТЭЦ-3 на качество поверхностных вод.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Характеристика экосистемы оз. Пясино и связанных с ним рек. Пясино – озеро ледникового происхождения в России на юго-западе Северо-Сибирской низменности на территории Красноярского края, примерно в 20 км от Норильска. Замерзает оно в начале октября, вскрывается ото льда в конце июня – начале июля. Озеро имеет площадь 735 км² и среднюю глубину 4 м, является проточным и мелководным, с коэффициентом водообмена около 6 [Богданов, 1985]. Высота над уровнем моря 28 м. Из озера вытекает единственная р. Пясины, основной приток – р. Норильская, который можно считать верхним течением р. Пясины. Река Норильская при впадении в озеро образует речную дельту, частью которой является также р. Амбарная. Другие притоки озера незначительны. Площадь водосбора 24000 км². Берега Пясино в основном пологие, местами заболоченные. Озеро собирает воды крупных озер – Лама, Кета и Глубокое в горах Путорана [Вода России, 2020].

Река Пясины впадает в Пясинский залив Карского моря. Длина ее 818 км, площадь бассейна реки, где расположено свыше 60 тыс.

озер общей площадью 10,45 тыс. км², составляет 182 тыс. км² [Форины и др., 2020].

Амбарная – река на севере Красноярского края России, протекает по Таймырскому Долгано-Ненецкому району. Длина реки 60 км, водосборная площадь 428 км². Берет исток из оз. Амбарное, впадает в оз. Пясино [Государственный водный реестр, 2020].

Станции отбора проб, полевые измерения и лабораторные анализы. Отбор проб воды объемом 6,5 л (2 л в стеклянную тару и 4,5 л в пластиковую) для гидрохимических исследований проводили по единой для БНЭ сетке из 13 станций (рис. 1), за исключением станции 6, где пробоотбор не состоялся по техническим причинам. Химический анализ проб по 34 показателям был проведен в аккредитованной лаборатории ФБУЗ “Центр гигиены и эпидемиологии в Красноярском крае” в г. Норильске по стандартным методикам, за исключением мутности и жесткости (табл. 1). Непосредственно на месте отбора проб определено 12 показателей качества вод с помощью многопараметрического зонда YSI 6600 V2-4 (США).

Проведенные исследования химического состава загрязненных и фоновых участков касались только водной среды и были ограничены по времени 4–11 августа 2020 г. Следовательно, полученная картина является пространственным и временным срезом гидрохимических показателей в Норило-Пясинской водной системе через два месяца после аварии на ТЭЦ-3 г. Норильска.

Статистическая обработка данных. Анализ различий между станциями по комплексу гидрохимических показателей выполнен методом главных компонент (РСА). Анализ проводили отдельно для интегральных и прочих химических показателей. Метод главных компонент является наиболее широко используемым подходом мультивариантной статистики, позволяющим увидеть закономерности в данных (особенно сходство и различия между объектами, характеризующимися множеством параметров), которые нельзя обнаружить на основе анализа отдельных компонент [Quinn, Keough, 2002]. Чтобы унифицировать шкалы и привести данные ближе к нормальным распределениям, значения были трансформированы с помощью функции $\ln(x + 1)$, за исключением показателей рН и ORP,

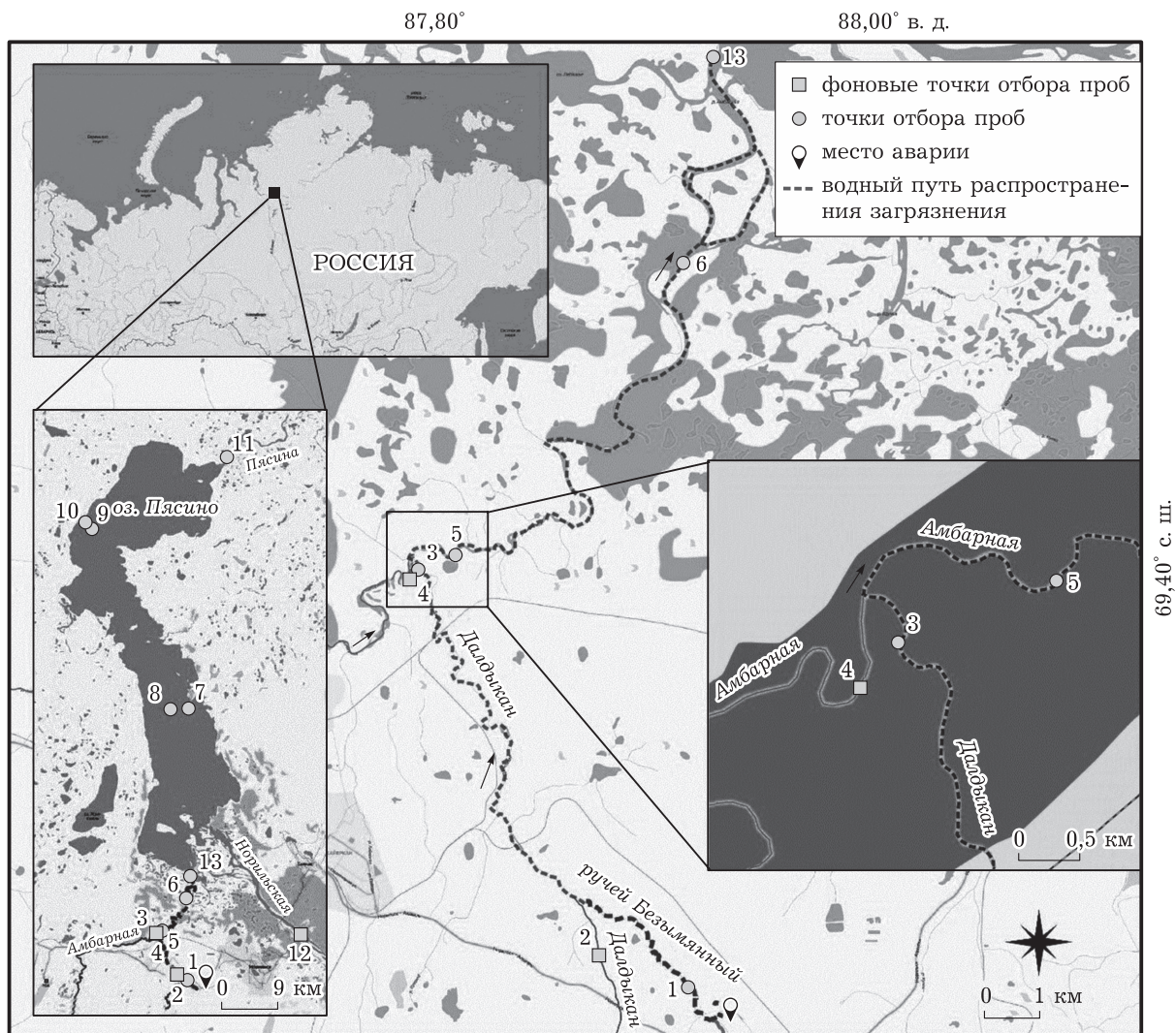


Рис. 1. Карта-схема отбора проб для гидрохимических и биологических анализов во время проведения БНЭ в августе 2020 г. Пунктирной линией обозначен путь распространения загрязнения (дизельное топливо)

Таблица 1
Использованные методы химического анализа качества вод

Определяемый показатель	Нормативный документ используемого метода/методики испытаний
1	2
Цветность	ГОСТ 31868-2012
Мутность	ГОСТ Р 57164-2016
pH	ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97
Общая минерализация (сухой остаток)	ПНД Ф 14.1:2:4.114-97
Жесткость общая	ГОСТ 31954-2012
Окисляемость перманганатная (ПО)	ПНД Ф 14.1:2:4.154-99
Нефтепродукты (суммарно)	ПНД Ф 14.1:2:4.128-98
ПАВ анионоактивные	ПНД Ф 14.1:2:4.158-2000
Фенольный индекс	ИСО 6439
Щелочность	ГОСТ 31957-2012
Карбонаты	ГОСТ 31957-2012
Гидрокарбонаты	ГОСТ 31957-2012

1	2
Фосфаты	ГОСТ 18309-2014
Ртуть	МИ 2865-2004
БПК ₅	ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97
ХПК (бихроматная окисляемость)	ГОСТ 31859-2012
Кислород растворенный	ИСО 5814
Взвешенные вещества	ПНД Ф 14.1:2.110-97
Плавающие примеси	СанПиН 2.1.5.980-00
Нитриты (по NO ₂)	ГОСТ 33045-2014
Магний	ПНД Ф 14.1:2:4.167-2000
Кальций	ПНД Ф 14.1:2:4.167-2000
Хлориды	ПНД Ф 14.1:2:4.157-99
Нитраты (по NO ₃)	ПНД Ф 14.1:2:4.157-99
Сульфаты	ПНД Ф 14.1:2:4.157-99
Медь	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98
Цинк	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98
Марганец	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98
Кобальт	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98
Хром	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98
Никель	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98
Кадмий	ПНД Ф 14.1:2.253-09
Мышьяк	ПНД Ф 14.1:2.253-09
Свинец	ПНД Ф 14.1:2.253-09

и стандартизированы согласно рекомендациям [Legendre, Legendre, 1998]. Значения ниже порогов обнаружения считались нулевыми. Предварительный анализ с использованием пороговых значений показал, что картина распределений не меняется. Объединение станций в кластеры выполнено методом иерархического кластерного анализа для главных компонент (НСРС) в пакете FactoMineR [Lê et al., 2008; Husson et al., 2010] для статистического языка R [R..., 2021].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Интегральные показатели. Температура воды изученных водотоков менялась в широком диапазоне – от 23,2 °С (руч. Безымянный) до 14,7 °С (оз. Пясино, р-н мыса Голый). В руч. Безымянном температура была выше рыбохозяйственных нормативов, т. е. отличалась более чем на 5 °С от средних фоновых значений (фоновые участки рек Далдыкан, Амбарной, Норильской) – 17,2 °С (табл. 2). Ниже по течению температура воды постепенно снижалась и в оз. Пясино имела минимальные значения – 14,7–16,6 °С. Значимых различий данного показателя на различных глубинах озера не выявлено.

Связанные между собой величины *минерализации* и *электропроводности* воды имели максимальные значения в Безымянном ручье – 2,51 г/дм³ и 2596 мкСм/см соответственно, уменьшаясь вниз по течению ниже фоновых (см. табл. 2). Данные лаборатории и зонда при этом в общем совпадают. Значимых различий данных показателей на различных глубинах оз. Пясино не выявлено.

Показатель *pH* по данным зонда на загрязненных участках водотоков был близок к нейтральным значениям, на фоновых участках – слабощелочным.

Жесткость воды была наибольшей в Безымянном ручье, достигая 21,0 °Ж (очень жесткие воды), что значительно выше фоновых значений (6–6,5 °Ж). Ниже по течению жесткость постепенно снижалась, и в оз. Пясино имела уже значения ниже фоновых – 0,66–1,2 °Ж.

Щелочность воды контрольных участков была значительно ниже фоновых. Причем на участке № 3 (р. Далдыкан в районе устья) она менее 0,1 ммоль/дм³. Это, по всей вероятности, обусловлено крайне низкими концентрациями гидрокарбонатов в этом створе. Сходная связь с концентрациями гидрокарбонатов наблюдалась и на других створах.

Показатель	ПДК _{рыб.-хоз.} (макс/мин фоновое значене)	руч. Безы- мянный (На- деждинский) в районе ТЭЦ-3	р. Далдыкан выше устья руч. Безы- мянного (фон)	р. Далдыкан в районе устья	р. Амбарная выше устья р. Далдыкан (фон)
Интегральные					
Температура, °С*	20 (17,44)	23,21 ± 0,15	17,44 ± 0,15	18,63 ± 0,15	17,38 ± 0,15
Минерализация, мг/дм ³	(495)	2510 ± 200	439 ± 35	2030 ± 160	495 ± 40
Электропроводность, мкСм/см*	(582)	2596 ± 13	302,0 ± 1,5	1892,0 ± 9,5	582,0 ± 2,9
pH*	(8,24)	<u>7,2</u> ± 0,2	8,1 ± 0,2	<u>7,2</u> ± 0,2	8,2 ± 0,2
Жесткость, °Ж	(6,5)	<u>21,0</u> ± 2,7	6,0 ± 0,8	<u>12,8</u> ± 1,7	6,5 ± 0,8
Щелочность, ммоль/дм ³	(0,8)	<u>0,26</u> ± 0,05	0,94 ± 0,09	<u>≤ 0,1</u>	2,46 ± 0,25
Взвешенные вещества, мг/дм ³	Фон (3) + + 0,75 = 3,75	<u>19,6</u> ± 3,3	< 3	<u>14,1</u> ± 2,4	< 3
Мутность, NTU	(22,56)	<u>90,4</u> ± 0,3	-0,3 ± 0,3	61,7 ± 0,3	6,4 ± 0,3
Цветность, град.	(2,1)	< 1	< 1	< 1	< 1
Растворенный O ₂ , мг/л*	6 (5,82)	7,7 ± 0,1	9,3 ± 0,1	6,3 ± 0,1	10,8 ± 0,1
Eh, мВ*	(64)	<u>-60</u> ± 20	77 ± 20	<u>4</u> ± 20	64 ± 20
Перманганатная окисляемость (ПО), мг/дм ³	(1,1)	<u>266</u> ± 21	0,60 ± 0,10	<u>156</u> ± 12	1,0 ± 0,2
Бихроматная окисляемость (ХПК), мгО/дм ³	(< 10)	<u>496</u> ± 65	< 10	<u>277</u> ± 36	< 10
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	2,1	<u>255</u> ± 26	1,34 ± 0,16	<u>141</u> ± 17	1,45 ± 0,17
Химические					
Ca, мг/дм ³	180 (22,67)	359 ± 30	95,7 ± 8,0	199 ± 17	98,3 ± 8,3
Mg, мг/дм ³	40 (22,6)	<u>29,0</u> ± 2,4	13,3 ± 1,1	<u>27,1</u> ± 2,3	20,1 ± 1,7
Сульфаты, мг/дм ³	100 (274,40)	<u>901</u> ± 76	267 ± 22	<u>970</u> ± 82	274 ± 23
Хлориды, мг/дм ³	300 (9,26)	30,0 ± 2,5	5,95 ± 0,50	26,7 ± 2,2	9,26 ± 0,78
Гидрокарбонаты, мг/дм ³	(48,5)	<u>16,0</u> ± 2,9	57,3 ± 5,7	<u>≤ 6,1</u>	150 ± 15
Фосфаты, мг/дм ³	(0,062)	0,027 ± 0,014	0,036 ± 0,018	0,038 ± 0,019	0,027 ± 0,014
Cu, мг/дм ³	0,001	0,177 ± 0,037	< 0,01	0,177 ± 0,037	< 0,01
Zn, мг/дм ³	0,01	0,04 ± 0,01	< 0,004	0,017 ± 0,004	< 0,004
Mn, мг/дм ³	0,01	0,57 ± 0,08	< 0,01	0,7 ± 0,1	0,017 ± 0,004
Co, мг/дм ³	0,01	0,064 ± 0,011	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Ni, мг/дм ³	0,01	1,84 ± 0,26	0,034 ± 0,009	1,41 ± 0,20	< 0,015
Pb, мг/дм ³	0,006	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002
Cd, мг/дм ³	0,005 (0,0003)	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	0,0003 ± 0,0001
Нефтепродукты, мг/дм ³	0,05	0,29 ± 0,08	< 0,005	0,41 ± 0,12	< 0,005
Фенольный индекс, мг/дм ³	< 0,002	0,018 ± 0,004	< 0,002	0,016 ± 0,004	< 0,002
АПАВ, мг/дм ³	0,1	0,10 ± 0,03	< 0,025	0,11 ± 0,04	< 0,025
Комплексные показатели					
N _{jj} , %		52,6	10,5	47,4	5,3
ИЗВ-6		49,9	0,8	30,6	0,8

П р и м е ч а н и е. Жирный шрифт – показатели выше ПДК; подчеркнутый шрифт – показатели выше (ниже)

мические показатели оз. Пясино и связанных с ним водотоков, превышающие ПДК_{рыб.-хоз.} и фоновые значения

р. Амбарная ниже устья р. Далдыкан	р. Амбарная в районе устья	оз. Пясино в районе мыса Тон- кий, у берега	оз. Пясино в районе мыса Тонкий, в центре	оз. Пясино в районе мыса Гольий, у берега	оз. Пясино в районе мыса Гольий, в центре	р. Пясино в районе истока	р. Нориль- ская (фон)
показатели							
18,50±0,15	17,92±0,15	16,36±0,15	16,64±0,15	14,72±0,15	15,00±0,15	15,62±0,15	16,78±0,15
1270±100	1009±81	138±32	96±15	101±16	102±16	104±17	178±28
<u>1304,0</u> ±6,5	<u>1029,0</u> ±5,2	87,00±0,43	74,00±0,37	116,00±0,58	81,00±0,40	77,00±0,38	116,00±0,58
7,6±0,2	7,6±0,2	7,8±0,2	7,8±0,2	7,6±0,2	7,6±0,2	7,5±0,2	7,8±0,2
<u>12,1</u> ±1,6	<u>7,9</u> ±1,0	0,78±0,10	0,66±0,09	1,1±0,1	0,73±0,10	0,73±0,10	1,2±0,2
0,88±0,09	0,35±0,06	0,55±0,05	0,48±0,09	0,56±0,06	0,54±0,05	0,51±0,05	0,80±0,08
<u>8,9</u> ±2,2	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3
33,1±0,3	6,9±0,3	10,4±0,3	4,1±0,3	7,6±0,3	3,7±0,3	6,9±0,3	22,6±0,3
< 1	3,6±0,9	4,0±1,0	4,2±1,0	3,2±0,8	3,1±0,8	3,2±0,8	2,1±0,5
6,5±0,1	5,8 ±0,1	10,0±0,1	9,8±0,1	10,0±0,1	9,9±0,1	9,7±0,1	9,7±0,1
<u>-53</u> ±20	157±20	113±20	111±20	108±20	100±20	111±20	114±20
<u>114,0</u> ±9,0	<u>106,0</u> ±8,0	1,2±0,2	2,0±0,2	0,92±0,16	1,1±0,2	1,0±0,2	1,1±0,2
<u>199</u> ±34	<u>139</u> ±24	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
<u>94</u> ±11	77,0±9,2	0,85±0,10	1,13±0,14	0,72±0,09	0,78±0,09	0,77±0,09	0,80±0,10
элементы и вещества							
186 ±16	136±11	12,3±1,0	11,42±0,96	16,0±1,3	11,65±0,98	11,9±1,0	22,7±1,9
<u>25,6</u> ±2,2	22,7±1,9	2,28±0,27	2,12±0,25	3,68±0,43	2,48±0,29	2,19±0,26	4,79±0,56
<u>725</u> ±61	<u>633</u> ±53	21,2±1,8	16,4±1,4	38,5±3,2	20,5±1,7	20,38±0,45	60,30±0,61
19,3±1,6	12,8±1,1	2,51±0,51	2,13±0,43	2,96±0,60	2,11±0,43	2,24±0,45	3,03±0,61
53,8±5,4	<u>21,1</u> ±3,8	33,3±3,3	29,0±5,2	33,9±3,4	32,6±3,3	30,8±3,1	48,5±4,9
0,085±0,043	0,165±0,082	0,019±0,009	0,036±0,018	0,040±0,020	0,029±0,015	0,031±0,016	0,062±0,031
<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
<0,004	<0,004	< 0,004	< 0,004	< 0,004	< 0,004	< 0,004	< 0,004
0,42 ±0,09	0,54 ±0,08	<0,01	0,017 ±0,004	<0,01	0,010±0,003	<0,01	<0,01
<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015
0,75 ±0,11	0,38 ±0,08	0,043±0,011	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015
< 0,002	< 0,002	0,033±0,006	<0,002	0,007 ±0,001	0,009 ±0,002	0,029 ±0,005	<0,002
0,0003±0,0001	<0,0002	0,0045±0,0008	0,0007±0,0002	<0,0002	<0,0002	0,0005±0,0001	<0,0002
0,22 ±0,06	0,15 ±0,04	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
0,016 ±0,004	0,012 ±0,004	< 0,002	<0,002	<0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002
0,08±0,03	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
степени загрязненности воды							
36,8	31,6	10,5	0,0	0,0	5,26	5,3	0,0
20,0	16,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3

фоновых; * – данные многопараметрического зонда.

Содержание взвешенных веществ было наибольшим в Безымянном ручье, достигая 19,6 мг/дм³ (выше рыбохозяйственных нормативов), что значительно больше фоновых значений. Ниже по течению концентрация взвешенных веществ постепенно снижалась, и в оз. Пясино составила <3 мг/дм³, т. е. ниже пределов обнаружения используемого метода, как и на фоновых участках.

Мутность воды менялась в соответствии с содержанием взвеси и также была максимальной в Безымянном ручье – 90,4 NTU, что значительно выше фоновых значений. Столь высокие значения могли быть обусловлены активными рекультивационными земляными работами в водосборе ручья или иными антропогенными факторами. Ниже по течению мутность постепенно снижалась и в оз. Пясино (3,7–10,4 NTU) была уже сопоставима с фоновыми значениями (0–22,6 NTU), причем данные лаборатории и зонда показали схожую динамику. Значимых различий данного показателя на различных глубинах озера не выявлено.

Цветность воды изученных водных объектов существенно отличалась, что связано с содержанием в ней природных гуминовых и фульвокислот или железа. Наибольшей она была в озере, достигая 4,2 градуса (см. табл. 2), что сопоставимо с фоновым значением р. Норильской (2,1 градуса). Эти значения могли быть обусловлены процессами заболачивания в водосборах этих водных объектов, а не антропогенными факторами.

По данным зонда содержание растворенного кислорода на фоновых участках и в оз. Пясино было приблизительно одинаковым и находилось на уровне 9,8–10,0 мг/дм³ (см. табл. 2). На участках, подвергшихся загрязнению, концентрация кислорода падала до 5,8–7,7 мг/дм³, т. е. приблизилась к ПДК для рыбохозяйственных водоемов (ПДК_{рыб.-хоз.}) – 6 мг/дм³. На этих же участках наблюдалось снижение окислительно-восстановительного потенциала – Eh (за исключением устья р. Амбарной) вплоть до отрицательных значений. Это, по-видимому, связано с активными окислительными процессами, которые наблюдаются на этих участках, так как вода содержала металлы низких валентностей, а также серу в виде сульфидов (для данной местности характерны сульфидные руды). При этом

водный объект является малым и текучим, что обуславливало хорошую аэрацию воды, но при этом кислород не успевал окислить все сульфиды до сульфатов в присутствии большого количества дизельного топлива.

Измеренные гидрохимические показатели, связанные с общим содержанием органических веществ, таких как перманганатная окисляемость (ПО), бихроматная окисляемость (ХПК) и биохимическое потребление кислорода (БПК₅), имели сходное распределение по станциям. На загрязненных участках, начиная от Безымянного ручья до устья р. Амбарной, показатели демонстрировали снижение: ПО – с 266 до 106,0 мг/дм³, ХПК – с 496 до 139 мгО/дм³, БПК₅ – с 255 до 77,0 мгО₂/дм³. Для фоновых участков рек, оз. Пясино и р. Пясины эти показатели были на один – два порядка ниже: ПО – 0,60–2,0 мг/дм³, ХПК – <10 мгО/дм³ и БПК₅ – 0,72–1,34 мгО₂/дм³. Следует отметить, что нефтепродукты также относятся к группе органических веществ, которые определяются этими показателями.

Химические элементы и вещества. Большинство исследованных элементов и веществ имело сходное пространственное распределение – максимальные концентрации регистрировались в непосредственной близости к территории ТЭЦ-3 (ручей Безымянный) и затем, по мере продвижения к оз. Пясино и истоку р. Пясины, их содержание падало до уровня ниже фоновых значений (участки 2, 4, 12) и ПДК_{рыб.-хоз.}

Концентрация кальция в Безымянном ручье была 359 мг/дм³, что значительно больше фоновых значений и ПДК_{рыб.-хоз.} (см. табл. 2). В реках Далдыкан и Амбарной концентрация кальция снижалась до 199 и 186 мг/дм³ соответственно, и в оз. Пясино была на уровне 11,42–16,0 мг/дм³.

Концентрация магния менялась аналогично концентрации кальция. Наибольшей она была в Безымянном ручье (точка № 1), достигая 29,0 мг/дм³, что значительно больше фоновых значений, но ниже ПДК_{рыб.-хоз.}. В оз. Пясино концентрация магния составила 2,12–3,68 мг/дм³.

Наибольшее содержание сульфатов обнаружено на участках 1 и 3 – 901–970 мг/дм³, это выше фоновых значений и более чем в 9 раз выше ПДК_{рыб.-хоз.}. Ниже по течению их

концентрации снижались до 633–725 мг/дм³ на станциях 5 и 13 и в озере были уже ниже фоновых значений и ПДК_{рыб.-хоз.} – 16,4–38,5 мг/дм³.

По данным исследований концентрации хлоридов в воде изученных водных объектов были незначительными. Максимум наблюдался на участке 1 – 30,0 мг/дм³, это выше фоновых значений, но ниже ПДК_{рыб.-хоз.}. Далее, вниз по течению уровень хлоридов еще снижался и в оз. Пясино был уже ниже фоновых значений (2,11–2,96 мг/дм³).

Высокие концентрации гидрокарбонатов были характерны для чистых участков вод, совпадая с повышенной щелочностью и высоким рН.

Содержание минерального азота в форме нитратов и нитритов в воде изученных водных объектов было незначительным. Максимальная концентрация нитратов обнаружена в р. Амбарной на фоновом участке и составила 5,05 мг/дм³, но и это намного ниже ПДК_{рыб.-хоз.}. То есть произошедший разлив нефтепродуктов не повлиял на содержание нитратов в поверхностных водах. Максимальное содержание нитритов было в Безымянном ручье – 0,66 мг/дм³, это выше фоновых значений, но ниже ПДК_{рыб.-хоз.}.

Количество фосфатов в воде изученных водных объектов было умеренным. Максимальные значения (до 0,165 мг/дм³) были на участках 6 и 5 р. Амбарной – это несколько выше фона и соответствует слабозагрязненным водам, остальные участки по этому показателю можно охарактеризовать как чистые [Оксиюк и др., 1993].

Среди общего списка исследованных тяжелых металлов (Hg, Cu, Zn, Mn, Co, Cr, Ni, Cd, Pb), Hg и Cr были ниже уровня обнаружения (<0,00001 и <0,02 мг/дм³ соответственно) на всех участках. Содержание Co было также ниже пределов обнаружения (<0,015 мг/дм³), за исключением одной пробы в Безымянном ручье, где его концентрация составила 0,064 мг/дм³, что выше ПДК_{рыб.-хоз.} в 6,4 раза. Высокие концентрации Zn (0,017–0,04 мг/дм³) и Cu (0,177 мг/дм³) были ограничены двумя участками – руч. Безымянным и р. Далдыкан, ниже впадения ручья. На остальных участках концентрации Zn и Cu были ниже порога обнаружения (<0,004 и <0,01 мг/дм³ соответственно). Высокие кон-

центрации Ni и Mn имели более широкую зону распространения – от Безымянного ручья до устья р. Амбарной (загрязненные участки). Содержание Ni градиентно снижалось по течению от 1,84 до 0,38 мг/дм³, значительно превышая ПДК_{рыб.-хоз.} – 0,01 мг/дм³. В оз. Пясино Ni был ниже уровня обнаружения <0,015 мг/дм³, за исключением одной береговой станции в районе мыса Тонкий – 0,043 мг/дм³. Концентрация Mn на загрязненных участках была в диапазоне 0,42–0,7 мг/дм³, что также значительно выше ПДК_{рыб.-хоз.} – 0,01 мг/дм³. На фоновых участках рек и в оз. Пясино Mn присутствовал в заметно меньших концентрациях (0,010–0,017 мг/дм³) либо был ниже уровня обнаружения (<0,01 мг/дм³). Наибольшие концентрации свинца в воде изученных водных объектов наблюдались в оз. Пясино, достигая 0,033 мг/дм³ (см. табл. 2), что значительно превышает ПДК_{рыб.-хоз.} (в 5,5 раза) и фоновые значения, которые были ниже пределов обнаружения методом химического анализа. Содержание кадмия в воде изученных водных объектов было незначительным, однако его максимальная найденная концентрация 0,0045 мг/дм³ обнаружена на участке 7 оз. Пясино, что ниже ПДК_{рыб.-хоз.} (0,01 мг/дм³), при этом по Комплексной классификации качества поверхностных вод суши [Оксиюк и др., 1993] такое значение соответствует “весьма грязным водам”.

По данным лабораторных исследований содержания нефтепродуктов в воде изученных водных объектов их пространственное распределение крайне неоднородно. Содержание нефтепродуктов в воде наиболее загрязненных участков водотоков (ручей, реки Далдыкан, Амбарная) значительно выше фоновых (до 0,41 мг/дм³). Причем, как ранее было показано, на участках 1 и 5 наблюдались восстановительные условия в водной среде (низкие и отрицательные значения Eh). Это, по всей вероятности, обусловлено активными окислительными процессами нефтепродуктов, которые наблюдаются на этих участках. Там же характерны максимальные величины других показателей валового содержания органических веществ (ХПК, ПО и БПК₅). Следует отметить, что нефтепродукты также относятся к группе органических веществ, которые определяются этими методами. Однако в оз. Пясино концентрации нефте-

продуктов находятся в пределах фоновых значений (ниже пределов обнаружения используемых методов химического анализа) и ниже ПДК_{рыб.-хоз.}, что может свидетельствовать об эффективности использованных боновых заграждений для защиты от распространения нефтепродуктов.

Содержание фенолов в воде наиболее загрязненных участков водотоков (ручей Безымянный, реки Далдыкан, Амбарная) значительно выше фоновых (до 0,018 мг/дм³). Ниже по течению их концентрации плавно падали. Причем, как ранее было показано, на участках 1 и 5 наблюдались восстановительные условия в водной среде, обусловленные, по-видимому, активными окислительными процессами органики (нефтепродуктов), которые отмечаются на этих участках. Для этих же участков характерны максимальные величины других показателей валового содержания органических веществ (ХПК, ПО и БПК₅). Следует отметить, что фенолы также относятся к группе органических веществ, которые определяются этими методами. Однако в оз. Пясино концентрации фенолов находятся в пределах фоновых значений (ниже пределов обнаружения используемых методов химического анализа), т. е. ниже ПДК_{рыб.-хоз.}. Таким образом, можно предположить, что повышенные концентрации фенолов обусловлены проливом нефтепродуктов на ТЭЦ-3.

По данным лабораторных исследований анионные поверхностно-активные вещества (АПАВ) в воде изученных водных объектов пространственно распределены крайне неоднородно. Содержание АПАВ в воде наиболее загрязненных участков водотоков (ручей и р. Далдыкан) значительно выше фоновых и немного выше (1,1 раза) ПДК_{рыб.-хоз.}, достигая максимума в створе 3 (0,11 мг/дм³). Ниже по течению их концентрации падали. Причем в оз. Пясино концентрации АПАВ были уже в пределах фоновых значений (ниже пределов обнаружения используемых методов химического анализа) и ниже ПДК_{рыб.-хоз.}.

Комплексные показатели степени загрязненности воды. По нашим расчетам коэффициент комплексности загрязненности (N_{fj}) [РД 52.24.643-2002] воды на различных участках исследованных водных объектов менялся от 52,6 % (III категория вод) в ручье до 0,0 % (I категория вод) в оз. Пяси-

но. Причем он плавно снижался вниз по течению от ручья к озеру. Следует отметить, что на фоновом участке р. Далдыкан он достигал 10,5 % (II категория вод). *Индекс загрязненности вод* (ИЗВ-6) [Временные методические указания..., 1986] на различных участках исследованных водных объектов менялся от 49,9 (чрезвычайно грязные воды) в ручье до 0,2 (чистые воды) в оз. Пясино. Причем он плавно снижался вниз по течению от ручья к озеру (см. табл. 2). Следует отметить, что на фоновом участке р. Далдыкан он достигал 0,8 (чистые воды), что в 4 раза выше, чем в озере.

Результаты РСА- и НСРС-анализов. Результаты статистических расчетов по методу главных компонент и кластерного анализа представлены для интегральных показателей на рис. 2, а для химических элементов и веществ – на рис. 3. По всем исследуемым гидрохимическим параметрам наблюдался ярко выраженный экологический градиент вдоль первой главной компоненты (PC1), объясняющей 69,5 и 57,2 % вариаций интегральных и химических показателей соответственно. В сумме PC1 и PC2 давали 86,3 и 72,1 % объясненной вариации интегральных и химических показателей соответственно. Высокие проценты двух первых главных компонент показывают, что полученные биplotы очень хорошо отображают структуру данных гидрохимических и гидрофизических измерений.

Интегральные показатели более четко отделяют загрязненные участки от фоновых станций. Загрязненные участки – руч. Безымянный, р. Далдыкан (после впадения ручья) и р. Амбарная (после впадения Далдыкана) образуют первый кластер. Река Амбарная в районе впадения в оз. Пясино несколько снижает показатели и отделяется от загрязненных участков первого кластера. Наименее загрязненные по интегральным показателям являются исследованные участки оз. Пясино (центральные и северные зоны) и фоновые участки рек Далдыкан и Амбарной и р. Норильская (в районе аэропорта Валек). Однако фоновые участки рек Далдыкан и Амбарной образуют отдельный кластер благодаря таким связанным показателям, как высокий pH и щелочность, а также более низкой цветности воды.

Картина разделения исследованной водной системы на загрязненные и незагрязненные

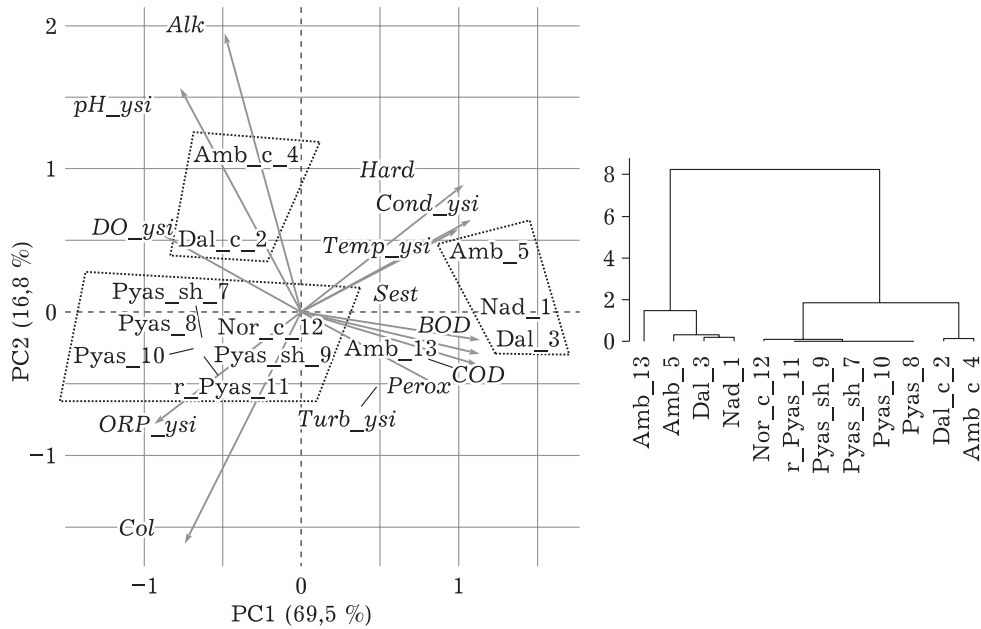


Рис. 2. PCA биplot распределения загрязненных и фоновых (с) участков руч. Безымянный/Надеждинский (Nad), рек Далдыкан (Dal), Амбарная (Amb) и оз. Пясино (Pyas). Цифрами обозначены номера станций, sh – прибрежная станция (см. рис. 1) относительно интегральных гидрофизических и гидрохимических показателей (ysi – измерения выполнены с помощью зонда). Первые две главные компоненты объясняют в сумме 86,3 % вариаций. Объединение участков в кластеры выполнено методом НСРС

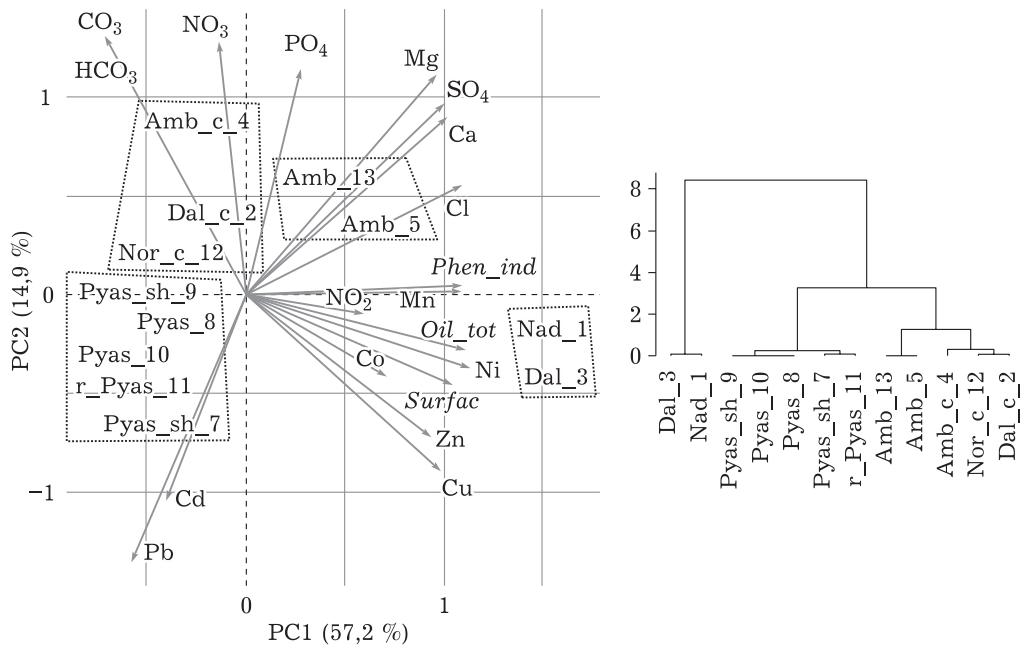


Рис. 3. PCA биplot распределения загрязненных и фоновых (с) участков руч. Безымянный/Надеждинский (Nad), рек Далдыкан (Dal), Амбарная (Amb) и оз. Пясино (Pyas). Цифрами обозначены номера станций, sh – прибрежная станция (см. рис. 1) относительно комплекса исследуемых гидрохимических показателей. Первые две главные компоненты объясняют в сумме 72,1 % вариаций. Объединение участков в кластеры выполнено методом НСРС

участки по отдельным химическим элементам и веществам практически совпадает с картиной, полученной на основе интегральных показателей (см. рис. 3). Отличия связаны с тем, что самые загрязненные участки – руч. Безымянный и р. Далдыкан, после впадения в него ручья, выделились в отдельный кластер. Участки р. Амбарной после впадения Далдыкана и в устье объединились в один кластер в основном благодаря умеренному загрязнению при повышенном содержании фосфатов. Исследованные участки оз. Пясино, р. Пясины и фоновые участки рек Далдыкан, Амбарной и Норильской образуют наименее загрязненную группу участков, состоящую из двух кластеров (см. рис. 3). Выделение озерных участков, включая р. Пясины, в отдельный кластер обусловлено повышенным содержанием в них Рb и присутствием Cd одновременно, при низком уровне фосфатов.

Таким образом, гидрохимические исследования поверхностных вод Норило-Пясинской системы в августе 2020 г. показали закономерную картину снижения концентрации загрязняющих веществ в цепочке водных объектов: ручей Безымянный – р. Далдыкан – р. Амбарная – оз. Пясино – р. Пясины. То есть по мере удаления от промышленной зоны Норильского металлургического комбината концентрации загрязняющих веществ падали, и в оз. Пясино (центральная и северная части) уже находились ниже предельно допустимых значений ПДК_{рыб.-хоз.}. Единственный из исследованных показателей, по которому озеро находится выше ПДК_{рыб.-хоз.}, – это свинец. В озере также присутствовал кадмий, но его концентрация была незначительной. Фоновые участки рек, т. е. участки, исследуемые до впадения в них водотоков, несущих загрязнения (см. рис. 1), находились ниже ПДК_{рыб.-хоз.} по подавляющему большинству элементов и веществ. Исключение составляли незначительно превышающие допустимую концентрацию элементы Ni и Mn, однако, наиболее вероятно, это может быть объяснено высоким региональным фоном по данным элементам.

Нефтепродукты после разлива дизельного топлива не регистрировались в поверхностных водах оз. Пясино и р. Пясины (согласно применяемым аналитическим методам), что указывает на эффективность принятых мер

задержки дизельного топлива боновыми заграждениями. С другой стороны, полученная картина распределения гидрохимических показателей является разовым измерением состояния водной системы в конкретный период времени 4–11 августа 2020 г., в который наблюдался низкий уровень вод и незначительные осадки. Возможно, в период половодья будет происходить смыв остатков дизельного топлива с берегов и повышение его концентрации в водных объектах. Дополнительным фактором, который необходимо учитывать при анализе гидрохимических показателей Норило-Пясинской системы, является влияние одновременно проводимого комплекса работ по ликвидации последствий аварии – снятие загрязненного почвенного слоя, откачка топливно-водной смеси, обслуживание заградительных и сорбирующих бонов. Возможно применение очистительных реагентов. В этой связи некоторые гидрохимические показатели могут испытывать соответствующее влияние – повышение уровня взвешенных веществ, понижение растворенного кислорода, изменение минерализации и т. д.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ архивных и литературных источников по гидрохимии данных водных объектов показал, что первые достоверные данные о гидрохимии бассейна р. Пясины были получены в 1932 г. [Ивлев, 1941], когда антропогенное воздействие в этом регионе было еще минимальное. 4 августа 1932 г. температура воды оз. Пясино составляла 7,2 °С, цветность – 1,8 градуса, сухой остаток – 48,0 мг/дм³, прокаленный остаток – 45,0 мг/дм³, рН – 6,64 (?), жесткость – 0,64 мг-экв./л, СаО – 11,8 мг/дм³, MgO – 2,7 мг/дм³, Fe – 0,09 мг/дм³, N нитратный – 0,0 мг/дм³, N нитритный – 0,002 мг/дм³, P₂O₅ – 0,01 мг/дм³, Cl – 3,0 мг/дм³. 11 августа 1932 г. температура воды составляла 6,32 °С, СО₂ свободный – 1,8 мг/дм³, рН – 7,38, жесткость р. Пясины (выше устья р. Агапы) – 0,54 мг-экв./л, Fe – 1,03 мг/дм³, ПО – 5,17 мгО₂/л. Этих данных недостаточно для полноценной экологической оценки, но они в общем соответствовали показателям незагрязненных северных водоемов и водотоков.

Согласно исследованиям 1980–2003 гг. [Румянцева, 2011, 2012], когда антропогенное

воздействие достигло максимальных значений, водные объекты бассейна р. Пясины – исследуемые поверхностные воды, в основном относились к группе пресных. Наиболее часто встречаемые значения минерализации вод р. Норильской были меньше 100 мг/дм³ и небольшие по величине интервала, что позволяло отнести их к ультрапресным. Для р. Амбарной (13 км от устья) и оз. Пясино (10 км от устья р. Амбарной) выявлены максимальные наблюдаемые значения солености – более 1400 мг/дм³. По соотношению анионов воды рек и озер системы носили переходный характер – от гидрокарбонатных к сульфатным. рН воды р. Амбарной обычно составлял 7,80–8,16 (максимально зафиксированы 6,10 и 8,85), а в оз. Пясино – 7,34–7,73, максимально достигая 5,90–8,80. Эти значения близки к полученным нами в 2020 г. Концентрация О₂ в воде р. Амбарной обычно составляла 9,47–10,7 мг/дм³ (минимальное значение 3,57 мг/дм³), а в оз. Пясино – 8,73–10,7 мг/дм³ (минимальное 3,41 мг/дм³). БПК₅ воды р. Амбарной в 1980–2003 гг. обычно составляло 0,4–0,9 мгО₂/дм³ (максимальное зафиксированное значение 8,9 мгО/дм³), а в оз. Пясино – 0,4–1,1 мгО₂/дм³ (максимальное 10,1 мгО/дм³). Характерные интервалы концентраций минеральных форм азота не превышают установленные ПДК, за исключением р. Амбарной (13 км от устья). Экстремально высокие концентрации аммонийного азота, указывающие на недавнее органическое загрязнение, в водах этих рек свидетельствуют о залповых сбросах бытовых сточных вод. Концентрации фосфатного фосфора в воде р. Амбарной ранее обычно не превышали 0,013–0,031 мг/дм³ (максимально 0,532 мг/дм³), а в оз. Пясино – 0,004–0,014 мг/дм³ (максимально 0,260 мг/дм³). Концентрации сульфатов в воде р. Амбарной также находились на высоком уровне – 3,8–62,3 мг/дм³ (максимальное значение 998 мг/дм³), а в оз. Пясино – 2,4–66,5 мг/дм³ (максимальное 992 мг/дм³). Концентрации цинка в воде р. Амбарной ранее обычно не превышали 0,001–0,009 мг/дм³ (максимальное 0,165 мг/дм³), в оз. Пясино – 0,002–0,012 мг/дм³, достигая 0,222 мг/дм³.

В этот же период концентрации нефтепродуктов в воде р. Амбарной до аварии на ТЭЦ-3 не превышали 0,09–0,11 мг/дм³ (максимальное значение 1,89 мг/дм³), а в оз. Пясино –

0,12–0,27 мг/дм³ (максимальное 2,5 мг/дм³) [Румянцева, 2011, 2012], такая же ситуация наблюдалась для некоторых других связанных с нефтепродуктами показателями: мутность, ПО, ХПК, БПК₅, кислород, Eh. Концентрации нефтепродуктов Норило-Пясинской системы увеличиваются в водах от оз. Лама к оз. Пясино, имели незначительную пространственную изменчивость за многолетний период. Анализ содержания нефтепродуктов в разные гидрологические сезоны показал увеличение в период летне-осенних паводков, когда концентрации выше ПДК в несколько раз. Причина такого процесса, возможно, состоит в непосредственном локальном загрязнении в период открытого русла. Содержания фенолов в воде р. Амбарной обычно не превышали 0,001–0,002 мг/дм³ (максимальное 0,040 мг/дм³), в оз. Пясино – 0,002–0,004 мг/дм³ (максимальное 0,074 мг/дм³). При этом концентрации летучих фенолов Норило-Пясинской системы увеличивались в водах от оз. Лама к оз. Пясино, имели незначительную пространственную изменчивость за многолетний период. Загрязнение воды р. Амбарной СПАВ ранее обычно не превышало 0,01–0,02 мг/дм³ (максимально отмечено 0,43 мг/дм³), а в оз. Пясино – 0,01–0,02 мг/дм³, достигая 0,31 мг/дм³.

По ретроспективным данным Росгидромета [Схема..., 2014] удельный комбинаторный индекс загрязненности вод (УКИЗВ) соответствует “грязному” и “загрязненному” состоянию качеству вод рек Норильской, Амбарной и Пясины (в истоке). Состояние вод в истоках рек Амбарной и Далдыкан характеризуется повышенным содержанием Си. В устье этих рек наблюдается превышение рыбохозяйственных нормативов по некоторым показателям. Река Норильская характеризовалась повышенным содержанием Мп, Си, фенолов и др.

Сравнение данных, полученных в 2020 г., и результатов гидрохимического мониторинга за предыдущие десятилетия показывает, что концентрации основных загрязняющих веществ (тяжелых металлов, сульфатов, нитритов, фенолов) достаточно сходны. Их повышенное содержание объясняется как природными, так и антропогенными факторами.

Как известно, для данной местности характерны минералы сульфидных медно-никелевых платиносодержащих руд Норильско-Талнахской группы месторождений [Ми-

рошникова и др., 2019], которые перерабатывают местные предприятия. Взаимодействие поверхностных и грунтовых вод с сульфидными рудами Cu, Ni, Zn, Mn, других тяжелых металлов и их окисление формируют сульфатные воды. С другой стороны, в составе промышленных отходов предприятий Норильского горно-металлургического комплекса сера и ее соединения, а также эти тяжелые металлы составляют значительную часть. Ранее также было отмечено, что донные отложения оз. Пясино местами загрязнены медью, мышьяком, никелем, свинцом и хромом [Старичков, 2002], их содержание в донных осадках озера достигает 494 г/т (>3 ПДК), 47 г/т (>20 ПДК), 170 г/т (42,5 ПДК), 70 г/т (3,5 ПДК) и 200 г/т (4 ПДК) соответственно.

Как уже отмечено, промышленный район Норильска, расположенный в центральной части верхнего водосборного бассейна р. Пясино, является основным источником техногенного загрязнения водной системы нефтепродуктами, фенолами, нитратами и тяжелыми металлами: Cu, Ni, Zn, Fe и др. [Иванов, Румянцева, 2011, 2012]. Озеро Пясино как заключительное звено Норило-Пясинской озерно-речной системы является естественным прудом-отстойником. Однако, очевидно, что самоочистительный потенциал озера не всегда справляется с сильным загрязнением.

Таким образом, исследованные гидрохимические параметры оз. Пясино и впадающих в него притоков в ходе проведения БНЭ отражают не только ухудшившуюся экологическую ситуацию в регионе, вызванную разливом дизельного топлива в мае 2020 г., но и накопленный многолетний эффект техногенного воздействия горно-рудного и промышленного производства на водные объекты. Подобная ситуация с трансформацией гидрохимического режима рек в результате многолетнего загрязнения при добыче и переработке полезных ископаемых характерна и для ряда других речных бассейнов арктической зоны России [Никаноров и др., 2001, 2010; Решетняк и др., 2014].

ВЫВОДЫ

1. В августе 2020 г. выявлено загрязнение водотоков водосборного бассейна оз. Пясино (руч. Безымянный/Надеждинский, реки Дал-

дыкан, Амбарная) нефтепродуктами, фенолами, трудно- и легкоокисляемыми органическими веществами (по показателям ХПК, ПО и БПК₅), взвешенными веществами, неорганическими солями и тяжелыми металлами выше фоновых значений и ПДК_{рыб.-хоз.}. Зафиксирована термофикация вод Безымянного ручья в районе ТЭЦ-3 г. Норильска.

2. Загрязненность поверхностных вод уменьшалась вниз по течению в ряду: ручей Безымянный – р. Далдыкан – р. Амбарная.

3. Загрязнение вод Безымянного ручья в районе ТЭЦ-3 (и далее ниже по течению) взвешенными веществами (повышение мутности) и неорганическими солями (повышение минерализации), вероятно, связано с рекультивационными работами, проходящими в его водосборном бассейне (в районе разлива дизельного топлива).

4. Загрязнение вод Безымянного ручья (и ниже по течению) нефтепродуктами, фенолами и органическими веществами, вероятно, связано с их вторичным загрязнением из донных отложений после пролива дизельного топлива.

5. Повышенное содержание кальция, меди, цинка, марганца, кобальта и никеля в воде исследованных притоков оз. Пясино, по всей вероятности, непосредственно с разливом дизельного топлива не связано, а обусловлено локальным геохимическим фоном или другими техногенными факторами, характерными для данной территории.

6. Признаков загрязнения воды исследованных участков оз. Пясино и р. Пясино в результате аварии не выявлено. Обнаруженные в воде этих водных объектов повышенные концентрации свинца, которые превышали ПДК_{рыб.-хоз.}, по нашим данным, объясняются региональным геохимическим фоном или другими факторами.

7. Использованные при анализе данных метод главных компонент (РСА) и иерархический кластерный анализ для главных компонент (НСРС) показали четкое отделение кластеров загрязненных участков водотоков – ручей Безымянный, р. Далдыкан и р. Амбарная от кластеров фоновых участков этих же рек и станций на оз. Пясино, как по интегральным, так и химическим показателям. Другими словами, выявлена достоверная локализация загрязненных участков.

8. Ретроспективный анализ качества поверхностных вод этого региона показал, что для водных объектов характерно загрязнение алюминием, железом, марганцем, медью, нефтепродуктами, никелем, нитритами, фенолами и цинком. Качество воды за последние десятилетия является неудовлетворительным.

9. Отмечена эффективность использованных боновых заграждений для локализации загрязнения нефтепродуктами. В весенне-летний период 2021 г. целесообразно продолжить их использование для недопущения распространения загрязнителей, смытых с водосборного бассейна и из донных отложений водотоков во время половодья и паводков.

ЛИТЕРАТУРА

- Богданов А. Л. История изучения, морфометрия и гидрология озер // География озер Таймыра. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1985. С. 184–193.
- Вода России: научно-популярная энциклопедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://water-ri.ru> (дата обращения: 29.10.2020).
- Временные методические указания по комплексной оценке качества поверхностных и морских вод. Утв. Госкомгидрометом СССР 22.09.1986. № 250-1163. М.: 1986. 5 с.
- Государственный водный реестр. Минприроды России [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://textual.gu/gvr> (дата обращения: 29.10.2020).
- Иванов В. В., Румянцева Е. В. Многолетняя изменчивость годового стока воды и химических веществ Норильско-Пясинской водной системы в условиях антропогенного воздействия // Вода: химия и экология. 2011. № 12. С. 23–28.
- Ивлев В. С. Гидрохимический очерк реки Пясины // Гидрохимические материалы / Гидрохимический ин-т АН СССР (Новочеркасск). М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1941. Т. XII. С. 169–181.
- Мирошникова Л. К., Склянов В. И., Уфатова З. Г. Минералы сульфидных медно-никелевых платиносодержащих руд Норильско-Талнахской группы месторождений. Норильск: Кактус, 2019. 148 с.
- Никаноров А. М., Брызгалов В. А., Косменко Л. С., Кондакова М. Ю., Решетняк О. С. Антропогенная нагрузка на устья рек Российской Арктики // Вклад России в Международный полярный год 2007/2008. Полярная криосфера и воды суши. М.; СПб.: Polar Editions, 2001. С. 288–303.
- Никаноров А. М., Брызгалов В. А., Косменко Л. С., Решетняк О. С. Роль химического речного стока в антропогенной трансформации состояния водной среды Енисейской устьевой области // Вод. ресурсы. 2010. Т. 37, № 3. С. 1–11.
- Оксиюк О. П., Жукинский В. Н., Брагинский Л. П., Линник П. Н., Кузьменко М. И., Кленус В. Г. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиол. журн. 1993. Т. 29, № 4. С. 62–76.
- РД 52.24.643–2002. Руководящий документ. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Ростов н/Д.: Росгидромет, 2002. 50с.
- Решетняк О. С., Никаноров А. М. Сравнительный анализ устьевых экосистем крупных рек России по антропогенной нагрузке // European Researcher. 2014. Vol. 84, N 10-1. P. 1806–1812.
- Румянцева Е. В. Многолетняя изменчивость качества поверхностных вод верхней части водосборного бассейна р. Пясины в условиях антропогенного воздействия // Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование и охрана: материалы IV Шк.-конф. молодых ученых с международным участием (26–28 августа 2011 г.). Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2011. С. 74–79.
- Румянцева Е. В. Анализ многолетней изменчивости водных ресурсов Норильско-Пясинской озерно-речной системы в условиях антропогенного воздействия: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2012. 24 с.
- Старичков Е. М. К геохимии донных отложений озера Пясино (Норильский район) // Зап. Горного ин-та. 2002. Т. 150, Ч. 2. С. 18–21.
- Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Пясины. Утверждена приказом Енисейского БВУ от 20 июня 2014 г. № 96.
- Форина Ю. Ю., Еремина М. В., Заделенов В. А. Кормовая база и промысел рыбы в бассейне реки Пясины // Ресурсы дичи и рыбы: использование и воспроизводство. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2020. С. 156–163.
- Husson F., Josse J., Pages J. Principal component methods-hierarchical clustering-partitional clustering: why would we need to choose for visualizing data // Appl. Mathem. Depart. 2010. P. 1–17.
- Lê S., Josse J., Husson F. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis // J. Stat. Soft. 2008. Vol. 25, N 1. P. 18. Epub 2008–03–18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>
- Legendre P., Legendre L. Numerical ecology. Amsterdam: Elsevier Science, 1998. 853 p.
- Quinn G., Keough M. J. Experimental design and data analysis for biologists. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2002. 537 p.
- R: A Language and Environment for Statistical Computing / R Core Team. R Foundation for Statistical Computing. URL: <https://www.R-project.org>. Vienna, Austria. 2021.

Hydrochemical indicators of water quality in Norilsk-Pyasino lake-river system after diesel fuel spill at Norilsk Heat & Power Plant 3 in 2020

D. M. BEZMATERNYKH¹, A. V. PUZANOV¹, A. V. KOTOVSHCHIKOV¹, A. V. DROBOTOV², A. P. TOLOMEEV^{2, 3}

¹*Institute for Water and Environmental Problems of SB RAS
656038, Barnaul, Molodezhnaya str., 1
E-mail: bezmater@iwepe.ru*

²*Institute of Biophysics of the Federal Research Center
“Krasnoyarsk Science Center of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/50*

³*Siberian Federal University
660041, Krasnoyarsk, Svobodny av., 79*

The results of the hydrochemical analysis of consequences of the accidental fuel release in the Norilsk-Pyasino water system are presented. Pollution of watercourses in the catchment of lake Pyasino (creek nameless/Nadezhdinsky, R. Daldykan, R. Ambarnaya) by oil products, phenols, easily oxidizable and hard to oxidize organic matter (COD, PO and BOD₅), suspended solids, inorganic salts and heavy metals with excess in MPS (including for fishery) as well as a temperature rise in waters of nameless creek nearby Norilsk Heat & Power Plant 3 were revealed. Contamination of the surface water decreases downstream in ascending order: nameless creek – Daldykan River – Ambarnaya River. The occurrence of petrochemical products, phenols and organic substances in the surface waters in two months after that spill is obviously due to their diffusion from the river bottom sediments, which accumulated a considerable amount of heavy fractions of diesel fuel after the accident. Increased concentrations of Ca, Cu, Zn, Mn, Co and Ni in waters of investigated tributaries of Lake Pyasino are not directly related to the accident; it results from the general technogeneous pollution of the territory and the increased geochemical background for the elements considered. Water contamination by oil products and phenols in the studied sections of Lake Pyasino (its central and northern parts) and R. Pyasino was not detected. However, concentrations of Pb exceeded MAP and Cd was present in the water, probably, due to accumulated pollutants in previous years.

Key words: hydrochemistry, water quality, River Pyasino, Lake Pyasino, Norilsk, diesel fuel.