

УДК 574.583:574.632(571.17)

Оценка влияния тяжелых металлов на планктон в техногенном водоеме

Р. Е. РОМАНОВ¹, Н. И. ЕРМОЛАЕВА², С. Б. БОРТНИКОВА³

¹Центральный сибирский ботанический сад Сибирского отделения РАН, ул. Золотодолинская, 101, Новосибирск 630090 (Россия)

E-mail: romanov_r_e@ngs.ru

²Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, Морской проспект, 2, Новосибирск 630090 (Россия)

³Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения РАН, проспект Академика Коптюга, 3, Новосибирск 630090 (Россия)

(Поступила 27.04.10; после доработки 28.03.11)

Аннотация

На примере водоемов системы Беловского отстойника (Кемеровская обл.) охарактеризованы видовой состав, структура и обилие фито- и зоопланктона техногенного водоема, образованного кислыми рудными дренажными водами. По химическому составу воды таких водоемов можно отнести к особому техногенному типу, не встречающемуся в естественных условиях. Видовое богатство и состав планктона отражают особенности химического состава воды и позволяют рассматривать эти водные объекты как экстремальные местообитания.

Ключевые слова: техногенный водоем, кислые рудные дренажные воды, фитопланктон, зоопланктон

ВВЕДЕНИЕ

Человеческая деятельность служит одним из системообразующих факторов для техногенных водоемов и водотоков – своеобразных экосистем, нередко обладающих экстремальными для живых организмов условиями окружающей среды. Характерные техногенные водные объекты формируются в регионах с экстенсивной добычей и переработкой полезных ископаемых. Развитие горнодобывающей промышленности Кузбасса привело не только к значительной трансформации экосистем водоемов и водотоков бассейна р. Томи, но и к появлению новых водных экосистем, образованных кислыми рудными дренажными водами (acid mine drainage). В таких водоемах возможно формирование сообществ живых организмов, изучение которых актуально не только для выяснения закономерностей освоения ими новых местообитаний с экстремаль-

ными условиями среды, но и для оценки изменений последних в результате жизнедеятельности гидробионтов. Полученные данные могут служить информационной основой для разработки способов биологической очистки и рекультивации этих антропогенных объектов.

Цель данной работы – характеристика состава и обилия планктона техногенного водоема, сформированного кислыми рудными дренажными водами отвала переработанных полиметаллических руд.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание объекта

Отвал расположен на территории Беловского цинкового завода (г. Белово, Кемеровская обл.) (рис. 1).

Завод начал свою работу в 30-х годах прошлого века и до 1990 г. стабильно производил

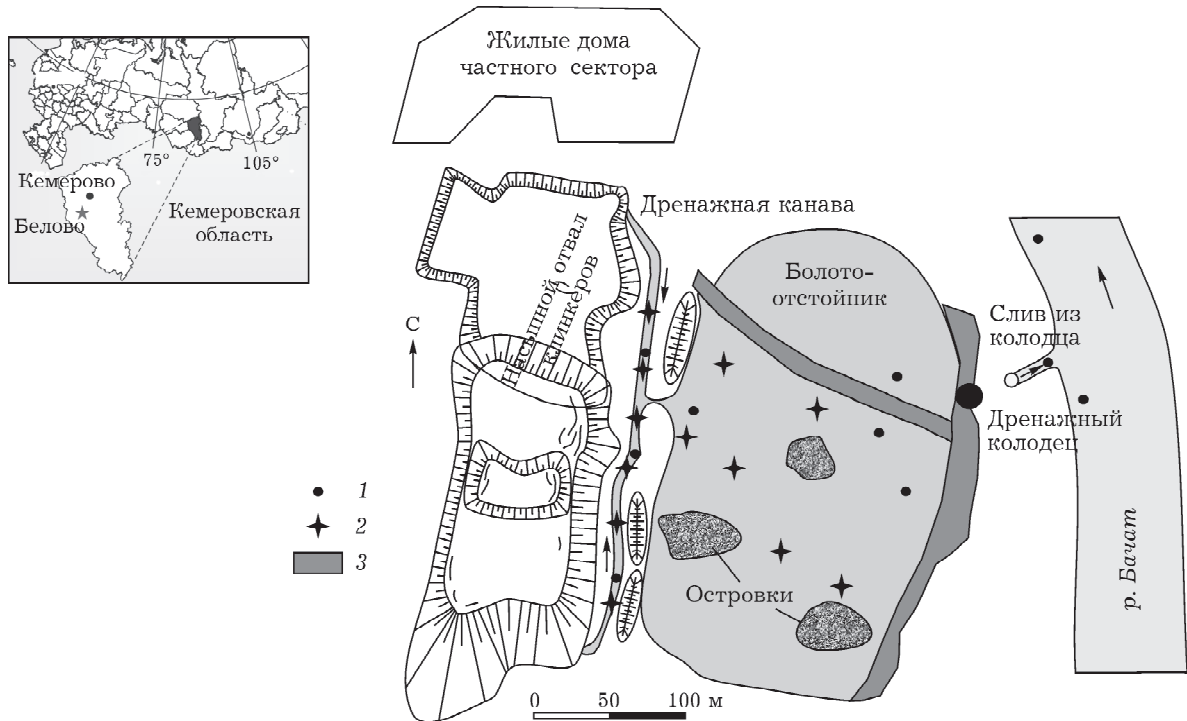


Рис. 1. Географическое положение и схема отбора проб Беловского болото-отстойника: 1 – пробы воды; 2 – пробы донных осадков; 3 – насыпная дамба.

ежегодно до 10 тыс. т цинка и попутно до 30 тыс. т H_2SO_4 . Производство было ориентировано на переработку сфалеритового концентрата, получаемого Салаирской свинцово-цинковой обогатительной фабрикой. С истощением сырьевой базы Салаирских месторождений завод работал на привозном сырье казахстанских месторождений. Вследствие низкого качества руд, тонких взаимных прорастаний сульфидных минералов, сложностей обогащения сфалеритовый концентрат содержал большое количество примесных элементов (Cu, Pb, Cd, As, Sb и др.), направляемых в отходы. С середины 90-х годов прошлого века завод прекратил свою деятельность. На территории остались складированными около 1 млн т отходов в виде шлаков и зол, содержащих значительное количество остаточной серной кислоты. Отходы складированы в виде насыпного отвала высотой 15 м с плоской верхушкой и крутыми склонами (около 45°). Визуально клинкеры представляют собой грубозернистый песок (доля фракции >4 мм составляет 50–65 %) типичного шлака. Основная его часть представлена силикатным стеклом с включениями полевого

шпата, оливина, шпинели, сплавов и небольшим количеством сохранившихся сульфидов [1]. Вследствие большого количества вростков различных сульфидов в сфалерите из рудного концентрата клинкеры характеризуются высоким содержанием металлов (табл. 1). Кроме того, в отвале присутствует 15–25 % коксовой пыли, добавляемой в технологичес-

ТАБЛИЦА 1

Усредненный химический состав клинкеров Беловского цинкового завода

Компонент	Содержание, %	Компонент	Содержание, г/т
SiO ₂	15–25	Cd	2–400
Al ₂ O ₃	3–5	As	100–500
CaO	4–6	Sb	500–1000
MgO	0.3–0.6	Ag	150–250
Fe	3–22	In	13
S	0.5–1.5	Te	2
C	10–25	Ga	36
Zn	0.7–14	Ge	8
Cu	0.3–8.5	Au	<4
Pb	0.03–0.7	Se	Следы

ком процессе. К особенностям этого отвала относится его горение в нескольких местах по причине самовозгорания свободной коксовой пыли. Об интенсивности процессов химического выветривания клинкеров свидетельствует появление обильных вторичных минералов на поверхности отвала; при этом сточные воды в обводной канаве имеют интенсивно синий цвет, а донные осадки и береговые отложения заболоченной близлежащей территории – белый, голубой и зеленоватый цвета.

Западная граница отвала ограничена болотом, куда стекает дренажный поток (см. рис. 1). Вода из болота поступает в дренажный колодец, а оттуда – в р. Бачат. На расстоянии 100–300 м от отвала расположен жилой поселок, что стало важным аргументом для оценки токсичности отвала и его влияния на окружающую среду.

Материалы и методы

В течение нескольких лет (1999–2008 гг.) исследовались вода и донные осадки дренажной системы (обводная канава и болото-отстойник). Отбор проб проводили в летнее и осеннее время, за исключением 2008 г., когда пробы растворов собирались зимой из-под льда, для чего пробуривались лунки. Вода отбиралась в полиэтиленовые емкости, которые ополаскивались трижды этой же водой на месте отбора. Растворы фильтровались, замерялись значения pH (с помощью портативного прибора фирмы HANNA HI 9025C). Точность измерений составляет ± 0.01 pH. Донные осадки (гидрогенные флокуляты) отбирались в полиэтиленовые пакеты, затем высушивались на месте и истирались для анализа в лабораторных условиях. Для сравнения состава воды в качестве фонового объекта выбрано Гавриловское водохранилище, расположенное в том же регионе в 40 км от г. Белово.

Растворы анализировались методами ИСП-АЭС. Метрологические характеристики атомно-эмиссионной спектроскопии соответствуют ГОСТ Р 51309–99 [2]. Относительная погрешность при данных концентрациях не превышала 10 %. Концентрация сульфат-ионов в растворах измерялась по стандартной турбидиметрической методике [3]. Определение содержания хлоридов в пробах проводили титри-

метрическим методом [4]. Донные осадки анализировались методом РФА-СИ [5].

Пробы фитопланктона отбирали в июне 2008 г. из поверхностного слоя воды, концентрировали прямой фильтрацией через мембранные фильтры с диаметром пор 0.55–0.65 мкм, фиксировали формалином, доводя его концентрацию до 2–4 %. Пробы обрабатывали в нефиксированном и фиксированном состояниях. Обилие фитопланктона определяли счетно-объемным методом с помощью камеры Фукса-Розенталя (объем 3.2 мм³). Параллельно получали численности клеток и индивидов – одиночных клеток, временных агрегатов, колоний, ценобиев, нитей, трихомов и т.п. без учета количества составляющих их клеток.

Пробы зоопланктона отбирали в феврале–марте, в июне–июле и в октябре 2008 г. методом фильтрования 300–350 л воды через сеть Апштейна (планктонный сачок), изготовленную из капронового сита № 64. Пробы фиксировали 4 % раствором формалина [6, 7]. Для идентификации таксономического состава и подсчета численности пробы зоопланктона анализировали в камере Богорова [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Воды дренажного ручья, вытекающего из-под насыпного отвала, относятся к типу высокоминерализованных металлосодержащих растворов (табл. 2). В период с 1999 до 2008 гг. происходило существенное изменение в состоянии отвала: прекратились процессы горения, снизилась температура дренажных потоков, несколько изменялся их состав. Важно отметить, что при опробовании в 2008 г. в зимнее время в растворах обнаружилось экстремально высокие концентрации многих химических элементов. Растворы относятся к сульфатному классу, а в катионном составе лидирующую роль играют цинк и медь (более половины всех катионов):

$$M_{18} \frac{SO_4 98 Cl 2}{(Zn + Cu) 54 Mg 21 Na 12 Ca 8 Al 4} pH 4.47$$

Такие воды могут быть выделены в особый техногенный тип, не встречающийся в естественных условиях. Концентрации многих микроэлементов (Co, Ni, Cd, As, Se, Be) достигают высоких значений, пре-

ТАБЛИЦА 2

Химический состав растворов отстойника и дренажной канавы, 2008 г. (февраль), мкг/дм³

Компоненты	Фон	Отстойник				Дренажная канавка	
		Северная часть		Южная часть			
pH	7.9	6.5	7.4	4.6	4.5	4.3	4
Cl ⁻	45	160	180	250	200	220	420
SO ₄ ²⁻	110	1800	2000	7100	10 500	27 000	12 900
NO ₃ ⁻	0.4	25	32	4.4	2.5	3.2	1.5
HCO ₃ ⁻	240	220	270	50	40	35	25
Na ⁺	5.7	510	200	210	500	1300	550
K ⁺	0.78	70	18	20	69	170	73
Ca ²⁺	44	380	220	320	410	440	620
Mg ²⁺	8	430	150	170	450	1180	520
Fe	0.029	0.11	0.24	0.23	0.1	0.4	0.55
Al	<0.1	11	<0.1	<0.1	12	260	32
Mn	0.006	31	4.6	2.2	32	110	39
Zn	0.01	4100	41	26	990	3200	11 000
Cu	0.003	4100	1.1	0.55	930	7300	12 000
Co	<0.1	8.6	0.66	0.70	9.3	31	13
Ni	0.096	6	0.46	0.37	6.1	20	9
Pb	0.009	1.3	0.013	0.008	1.5	3.5	1.5
Cd	0.020	8.4	0.31	0.13	5.4	14	2.6
Sr	0.24	2.6	2.5	2.7	2.7	1.1	1.8
Ag	0.78	8.2	1.4	1.6	9.6	3.1	3.50
Sn	2.9	2.9	0.26	<0.01	<0.01	<0.01	1.10
Sb	2.2	3.4	0.7	1.4	5.1	8.4	3.3
As	2.8	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	6.50	<0.05
Se	<0.01	100	0.0	22.0	110.0	3.60	1.90
Be	<0.0002	5.0	<0.001	<0.001	5.4	2.8	8.6

вышая фоновые по некоторым элементам на шесть порядков.

В летнем фитопланктоне водоемов системы Беловского отстойника выявлены 14 видов водорослей и цианобактерий (табл. 3), включая один аэрофильный вид, идентифицированный по пустому панцирю. Кроме того, обнаружены фототрофные клетки эукариот, идентификация которых даже до отдела или порядка оказалась проблематичной ввиду отсутствия выразительных морфологических признаков или низкой численности. Зеленые водоросли представлены наибольшим количеством видов. Минимальное видовое богатство обнаружено в дренажной канаве и участке

отстойника вблизи ее устья, в направлении от устья канавы оно возростало. *Chlamydomonas acidophila* и неидентифицированные жгутиконосцы (здесь и далее – *Chrysophyceae* или *Cryptophyta*) встречены на всех обследованных участках. Уродливые формы не обнаружены.

Обилие фитопланктона отстойника максимально вблизи устья дренажной канавы (рис. 2), в направлении от устья оно резко уменьшалось и затем немного возростало. Наиболее удаленная от устья канавы часть отстойника существенно не отличалась от дренажной канавы по численности фитопланктона, биомасса которого, напротив, была су-

ТАБЛИЦА 3

Таксономический состав фитопланктона водоемов системы Беловского отстойника в июне 2008 г.

Таксоны (отдел, класс, вид)	Дренажная канава	Участки отстойника ^в		
		№ 1	№ 2	№ 3
Цианопрокaryota, Cyanophyta				
<i>Hormogoniophyceae</i> gen. sp. status <i>pseudanabaenoides</i> ^а	-	-	+	-
Chlorophyta				
<i>Chlamydomonas acidophila</i> Negoro sensu Fott 1956	+	+	+	+
<i>Chlorophyceae</i> или <i>Trebouxiophyceae</i> gen. sp.	-	-	-	+
<i>Pseudoschroederia robusta</i> (Korsch.) Hegew. et E. Schnepf (<i>Schroederia robusta</i> Korsch.)	-	-	+	-
cf. <i>Stichococcus bacillaris</i> Näg. (cf. <i>S. minor</i> Näg. s. str.)	-	-	+	-
<i>Ulothrix</i> sp. ^б	-	-	-	+
Streptophyta, Charophyta				
<i>Klebsormidium subtile</i> (Kütz.) Tracanna ex Tell (<i>Ulothrix subtilis</i> Kütz. s. l.)	+	+	-	-
<i>Koliella</i> cf. <i>sigmoidea</i> Hind.	-	-	-	+
Heterokontophyta				
Стоматоцисты <i>Chrysophyceae</i> gen. sp.	-	-	-	*
Bacillariophyta				
<i>Achnanthes</i> s. l. sp.	-	-	+	-
<i>Bacillariophyceae</i> gen. sp.	-	-	-	*
<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehr.) Grun. in Cl. et Grun.	**	-	-	-
Cryptophyta				
<i>Cryptophyta</i> gen. sp.	-	-	+	-
Неидентифицированные жгутиконосцы (<i>Chrysophyceae</i> или <i>Cryptophyta</i>)				
	+	+	+	+
Всего одновременно вегетирующих видов, разновидностей и форм	3	3	7	7

Примечание. + Присутствие вида, * оболочка с остатками протопласта, ** пустой панцирь.

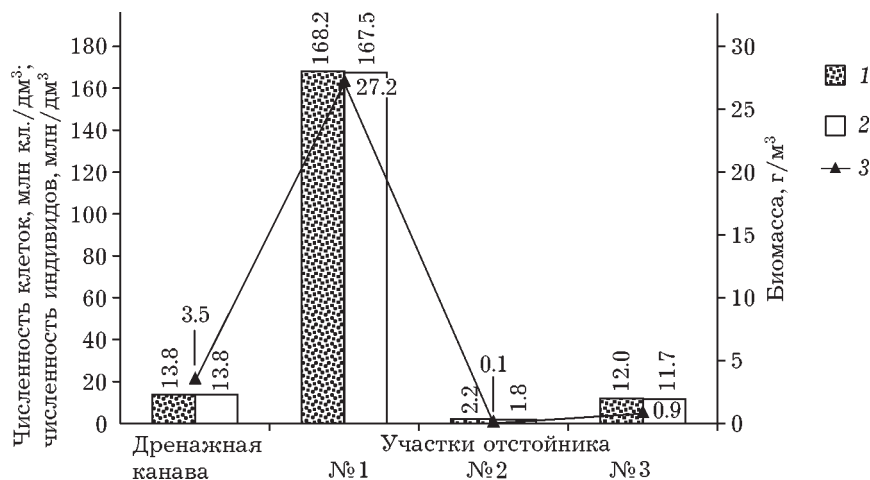
^а Стадия развития гормогониевых цианобактерий названа по [8].^б Необходимо уточнение, возможно, это представители рода *Klebsormidium* (Streptophyta).^в Участки отстойника в порядке удаления от устья дренажной канавы.

Рис. 2. Обилие фитопланктона в водоемах системы Беловского отстойника в июне 2008 г.: 1 - численность клеток, 2 - численность индивидов, 3 - биомасса.

щественно ниже, что указывает на преобладание относительно мелкоклеточных форм.

Зеленые водоросли составляют основу планктона дренажной канавы и прилегающего к ее устью участка отстойника. По мере удаления от устья их численность уменьшается, но существенно возрастает количество неидентифицированных жгутиконосцев. В планктоне дренажной канавы и прилегающего к ее устью участка отстойника по численности и биомассе абсолютно преобладает *Chlamydomonas acidophila* (примерно 100 % обилия фитопланктона). На участке № 2 наиболее многочисленными оказались *C. acidophila* (48 % количества клеток, 58 % количества индивидов, 27 % биомассы), неидентифицированные жгутиконосцы (20, 23 и 48 % соответственно), cf. *Stichococcus bacillaris* (14, 14 и 11 % соответственно) и цианобактерии (15 % количества клеток), на участке № 3 – неидентифицированные жгутиконосцы (42, 43, 83 % соответственно), *Koliella* cf. *sigmoidea* (51 % количества клеток, 50 % количества индивидов).

Зоопланктон в дренажной канаве и в ручье не обнаружен, его отдельные представители зафиксированы только в болоте-отстойнике. В зимних пробах обнаружено семь видов зоопланктона: Cladocera *Bosmina longirostris* O. F. Mull.; Rotatoria – *Filinia longiseta longiseta* (Ehrb.), *Keratella quadrata* (O. F. Mull.), *Keratella cochlearis* (Gosse), *Br. angularis angularis* (Gosse), *Brachyonus quadridentatus*, *Testudinella patina*. Среди обнаруженных организмов зоопланктона 90 % имеют морфологические деформации, что иногда значительно затрудняло видовое определение. У большей части коловраток значительно деформирован панцирь. Возможно, влияние высоких концентраций тяжелых металлов приводит к генетическим мутациям, поскольку практически все особи того или иного вида трансформированы одинаково. Интересно отметить, что аналогичные мутации обнаружены у представителей зоопланктона в ручье на территории предполагаемого освоения месторождения полиметаллических руд Каракуль (Кош-Агачский район, Республика Алтай, 2007 г.). В зимних пробах общая численность зоопланктона не превышала 730 экз./м³ при биомассе 0.36 мг/м³, тогда как в фоновых водоемах (р. Обь, пойменные озера р. Обь) эти

показатели составляли 1200–3700 экз./м³ и 2.72–65.00 мг/м³ соответственно. Доминировали в пробах коловратки (620 экз./м³, 0.24 мг/м³).

В пробах, отобранных в летнее и осеннее время, зоопланктон отсутствовал вовсе. Видимо, повышение температуры воды и ускорение метаболизма у зоопланктонных организмов привело к накоплению летальной дозы токсичных веществ для всех исследованных групп коловраток и ракообразных из воды отстойника [9].

Известно [10], что в водоемах с низким значением pH, закисленных рудными дренажными водами, обнаружены 51 вид и одна разновидность водорослей и цианобактерий. Согласно молекулярно-генетическим данным, появление в таких условиях среды некоторых таксонов, скорее, обусловлено колонизацией этих местообитаний локальными популяциями из циркумнейтральных условий (pH ~ 7), нежели расселением из близких по условиям среды водоемов, находящихся на значительном удалении [10].

Один из наиболее обильных видов летнего фитопланктона из водоемов озер системы Беловского отстойника – *C. acidophila* – обнаружен в водоемах Западной Сибири, по видимому, впервые. Форма переднего конца клетки отличается на разных изображениях этого вида [11–13]. Клетки *C. acidophila* водоемов системы Беловского отстойника спереди слабо заостренные и узко закругленные на вершине, передний конец слегка оттянут.

Этот вид обнаружен при pH 1.0–3.3 в вулканическом озере, илие сольфатары [12]; в вулканических прудах в тундре [14]; в малых искусственных водоемах в углублениях после добычи торфа (как *C. applanata* var. *acidophila* Fott) [11]; в озере, подверженном воздействию кислых рудных дренажных вод, формирующихся при разработке месторождений полезных ископаемых [10]. В целом, этот вид обычно обнаруживают в экстремально кислой среде [15–17], он адаптирован к низким значениям pH, высоким концентрациям тяжелых металлов [18] и низкой освещенности [19].

В планктоне озер, формирующихся на местах открытой разработки месторождений бурого угля и характеризующихся низкими значениями pH (средние значения pH ≤ 3), высокими электрической проводимостью и содержанием Fe, Al, Mn, отмечена 100 % встреча-

емость и наиболее частое доминирование *Chlamydomonas* spp. и *Ochromonas* spp. [14]. Возможно, неидентифицированные жгутиконосцы Беловского отстойника являются представителями указанных родов.

Низкое видовое богатство водорослей и цианобактерий, простая структура сообществ, обнаруженные в водоемах системы Беловского отстойника, – характерные особенности экстремальных местообитаний [20], в том числе и с низкими значениями рН [14, 17]. Водные экосистемы с низкими значениями рН можно охарактеризовать как относительно простые, где могут развиваться монокультуры фототрофных кислотоустойчивых жгутиконосцев из отдела зеленых водорослей [17].

По биомассе фитопланктона участок Беловского отстойника у устья дренажной канавы соответствует политрофному, дренажная канава – эвтрофному, участок № 2 – олиготрофному, участок № 3 – мезотрофному классу трофности [21]. Однако использование общепринятых признаков классов трофности в такой среде, по-видимому, некорректно [22].

Изменение состава фитопланктона может отражать, с одной стороны, комплексный градиент условий среды по мере удаления от дренажной канавы. С другой стороны, учитывая проточность системы Беловского отстойника, эту неоднородность можно рассматривать как разные стадии сукцессии сообщества, перемещающегося со средой обитания, условия которой изменяются.

Гидрохимический режим определяет видовой состав и структуру сообществ фитопланктона озер, формирующихся на местах открытой разработки месторождений бурого угля, в то время как трофический статус, идентифицированный по концентрациям биогенных элементов, определяет величину его биомассы [22]. Низкая первичная продуктивность в таких условиях может быть обусловлена высоким содержанием тяжелых металлов или низкой концентрацией растворенных фосфатов, но не кислой реакцией среды. Продуктивность водорослей в данных условиях также могут определять уровень инсоляции и спектральный состав проникающего в водную толщу солнечного света, а также содержание H_2S и CO_2 [23]. Тем не менее продукционный потенциал вод с низкими значениями

рН в редких случаях может быть высоким [22], хотя в целом он очень низкий [24]. В этих условиях формирование химического осадка на дне может исключать развитие бентосных [23], но не метафитонных форм.

С другой стороны, водоросли и цианобактерии могут различным образом изменять условия среды кислых рудных дренажных вод [23]. Несмотря на их присутствие в такой среде, непосредственный вклад этих организмов в улучшение качества воды, по-видимому, невелик. Возможно, одно из наиболее важных последствий развития водорослей и цианобактерий – внеклеточные органические вещества, которые служат источником углерода для популяций сульфатвосстанавливающих бактерий, жизнедеятельность которых, в свою очередь, приводит к повышению величины рН [23].

Зоопланктон в болоте-отстойнике развивается исключительно в подледный период и представлен формами, которые обнаруживаются в пресных водоемах Западной Сибири круглогодично. Причина такого явления может быть связана с особенностями жизнедеятельности зоопланктона. Покоящиеся яйца коловраток и ветвистоусых рачков окружены плотной оболочкой, защищающей их от неблагоприятных внешних воздействий, как температурных, так и химических. Веслоногие рачки такого преимущества лишены и постоянно подвергаются токсическому воздействию металлов. В летний период при повышении температуры воды возрастают скорость и интенсивность метаболизма у зоопланктонных организмов [25, 26]. Высокие концентрации тяжелых металлов оказываются сначала сублетальными, вызывая двуполое размножение и появление покоящихся яиц, а затем и летальными для зоопланктонных организмов. Таким образом, в летнее время все зоопланктонное сообщество беловского болота находится в состоянии диапаузы – “переживания” неблагоприятных условий. С понижением температуры снижается уровень метаболизма, из покоящихся яиц появляются ветвистоусые рачки и коловратки (скорее всего, уже представленные обоими полами) и успевают дать новую генерацию зоопланктона. В результате зимний зоопланктон в беловском болоте представлен только коловрат-

ками и ветвистоусыми рачками. Веслоногих раков, которые в норме переживают диапаузу в виде копеподитов II–III стадий, в обществе не зарегистрировано.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Воды Беловского отстойника (Кемеровская обл.) можно отнести по химическому составу к особому техногенному типу, не встречающемуся в естественных условиях. Видовое богатство и состав фитопланктона отражают особенности химического состава воды водоемов системы Беловского отстойника. Низкое видовое богатство и массовое развитие одного или немногих видов водорослей и цианобактерий характерно для разнотипных экстремальных местообитаний, в которых виды, оказывающиеся вне конкуренции, способны достигать массового развития. Зоопланктон практически не развит, поскольку высокие концентрации металлов в сочетании с низкими показателями рН оказывают на организмы зоопланктона летальное воздействие, которое при низких температурах несколько ингибируется снижением метаболизма. В результате ограниченно развиваются только коловратки и ветвистоусые ракообразные, способные переждать наиболее неблагоприятный период в стадии яиц, индифферентных к внешним токсическим воздействиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Sidenko N. V., Giere R., Bortnikova S. B., Cottard F., Palchik N. A. // *Geochem. Exploration*. 2001. Vol. 74, Nos. 1–3. P. 109–125.
- ГОСТ Р 51309–99. Вода питьевая. Определение содержания элементов методами атомной спектроскопии (1999). Введ. 20.08.1999. Госстандарт России, Москва, 21 с.
- Методика измерений массовой концентрации сульфатов в водах турбидиметрическим методом РД 52.24.405–95 (1995): утв. ГУЭМЗ Росгидромета 21.07.94, Ростов-на-Дону, 10 с.
- Методика выполнения измерений массовой концентрации хлоридов в природных и очищенных сточных водах титриметрическим методом с солью серебра РД 33–5.3.04–96 (1996): утв. ком. РФ по водному хозяйству 28.06.96. М., 15 с.
- Барышев В. Б., Колмогоров Ю. П., Кулипанов Г. Н., Скринский А. Н. // *ЖАХ*. 1986. Т. 41. С. 389–401.
- Киселев И. А. Планктон морей и континентальных водоемов. Т. 1. Л.: Наука, 1969. 638 с.
- Жадин В. И., Павловский Е. Н. Жизнь пресных вод. Т. 3. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1950. С. 314–319.
- Кондратьева Н. В. Морфогенез и основные пути эволюции гормонониевых водорослей. Киев: Наук. думка, 1972. 150 с.
- Смоляков Б. С., Бортникова С. Б., Ермолаева Н. И., Жигула М. В., Богуш М. В., Артамонова С. Ю. // *Водн. ресурсы*. 2004. Т. 31, № 3. С. 365–374.
- Novis P. M., Harding J. S. // *Algae and Cyanobacteria in Extreme Environments. Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology*. Vol. 11. Dordrecht: Springer, 2007. P. 443–463.
- Fott B. // *Preslia*. 1956. Vol. 28. P. 145–150.
- Fott B., McCarthy A. J. // *J. Protozoology*. 1964. Vol. 11 (1). P. 116–120.
- Ettl H. *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Band 9. Chlorophyta I. Phytomonadina. Jena: Gustav Fischer Verlag, 1983. 808 s.
- Lessmann D., Fyson A., Nixdorf B. // *Hydrobiologia*. 2000. Vol. 433. P. 123–128.
- Doi H., Kikuchi E., Shikano Sh., Takagi Sh. // *Aquatic Microb. Ecol.* 2004. Vol. 36. P. 285–291.
- Visviki I., Palladino J. // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2001. Vol. 66. P. 623–630.
- Nixdorf B., Fyson A., Krumbeck H. // *Environ. Experimental Botany*. 2001. Vol. 46. P. 203–211.
- Nishikawa K., Yamakoshi Y., Uemura I., Tominaga N. // *FEMS Microbiology Ecology*. 2003. Vol. 44. P. 253–259.
- Gerloff-Elias A., Spijkerman E., Schubert H. // *Freshwater biology*. 2005. Vol. 50, No. 8. P. 1301–1314.
- Seckbach J., Chapman D. J., Garbary D. J., Oren A., Reisser W. // *Algae and Cyanobacteria in Extreme Environments. Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology*. Vol. 11. Dordrecht: Springer, 2007. P. 465–485.
- Оксиок О. П., Жукинский В. Н., Брагинский Л. П., Линник П. Н., Кузьменко М. И., Кленус В. Г. // *Гидробиол. журн.* 1993. Т. 29, № 4. С. 62–76.
- Nixdorf B., Mischke U., Lessmann D. // *Hydrobiol.* 1998. Vol. 369/370. P. 315–327.
- Das B. K., Roy A., Koschorreck M., Mandal S. M., Wendt-Potthoff K., Bhattacharyya J. // *Water Res.* 2009. Vol. 43. P. 883–894.
- Nixdorf B., Krumbeck H., Jander J. and Beulker C. // *Acta Oecologica*. 2003. Vol. 24. S281–S288.
- Гутельмахер Б. Л. // *Тр. Зоологич. ин-та АН СССР*. Т. 133. Л.: Наука, 1986. 126 с.
- Сущеня Л. М. // *Тр. Севастопол. биол. станции*. 1963. Т. 16. С. 256–276.