АККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ И ОРГАНАХ И ТКАНЯХ СИГА (*COREGONUS LAVARETUS*) ОЗЕРА ИМАНДРА

Даувальтер В.А., Терентьев П.М.

Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Анапты, vladimir@inep.ksc.ru

Озеро Имандра расположено на крайнем северо-западе Европейской территории России, в Мурманской области (рис. 1). Котловина озера находится в глубокой тектонической депрессии, которая простирается с севера на юг от Кольского залива Баренцева моря до Кандалакшского залива Белого моря [1]. Эта депрессия делит Мурманскую область на две части: западную – материковую, и восточную – полуостровную. Озеро Имандра – самый крупный водоем в Мурманской области и одно из крупнейших в Заполярье: длина озера – 109 км, средняя ширина – 3.19 км, площадь с островами – 880.4 км², объем воды – 10.86 км³. Общая площадь водосбора озера составляет 12300 км².

Наличие уникальных месторождений полезных ископаемых и удобное расположение на пути основных транспортных магистралей привели к развитию мощного индустриального комплекса на территории водосбора, что вызвало высокую антропогенную нагрузку на озеро [1]. Среди основных производств выделяются следующие: горнодобывающая промышленность (ОАО «Апатит»), металлургическая промышленность (ОАО «Североникель»), железорудное производство (ОАО «Олкон»), энергетический комплекс (Кольская АЭС, Апатитская ТЭЦ, каскад Нивских ГЭС), а также муниципальные стоки населенных пунктов, расположенных на водосборе озера.

С целью оценки современного экологического состояния оз. Имандра и установления закономерностей аккумуляции и биогеохимического распределения металлов в экосистеме оз. Имандра (Ni, Cu, Zn, Mn, Al, Sr, Hg) проведены исследования химического состава воды, донных отложений (ДО) и органов и тканей сига (*Coregonus lavaretus*). Отбор проб ДО производился отборником колонок гравитационного типа. Колонки ДО послойно разделялись на слои по 1 см. Отлов рыбы производился набором жаберных сетей с различными размерами ячеи. Методика отбора и химического анализа проб ДО и органов и тканей сига подробно описана ранее [1-3]. Содержание металлов определялось методом атомной абсорбции. Для оценки интенсивности накопления металлов в органах и тканях сига рассчитывались величины коэффициента биологического накопления как отношение среднего содержания элемента в органе (в мкг/г в пересчете на сухой вес) к средней концентрации элемента в поверхностном (0-1 см) слое ДО оз. Имандра (также в мкг/г) (КБН_{ДО}) и к средней концентрации элемента в воде в мкг/л (КБН_{ВОДА}). Озеро условно было разбито на пять акваторий, в различной степени подверженных антропогенному влиянию, – северная (влияние стоков ОАО «Олкон» и комбината «Североникель»), центральная и южная (влияние стоков ОАО «Апатит») части Большой Имандры, Йокостровская Имандра (транзит загрязняющих веществ из Большой Имандры) и Бабинская Имандра (условно фоновая акватория). По этим акваториям были рассчитаны средние содержания металлов в воде, ДО, органах и тканях сига за последние десять лет. В общем итоге было проанализировано проб воды и донных отложений с 30 станций и около 150 экземпляров сегов.

Наиболее загрязненной акваторией озера является Большая Имандра, принимающая промышленные стоки медно-никелевого и апатитонифелинового производств (табл. 1). Концентрации Ni и Cu в поверхностных слоях ДО в десятки и сотни раз превышают фоновые значения. В Большой Имандре наблюдается также наибольшее содержание других тяжелых металлов – Zn (стоки комбината «Североникель»), Mn (стоки ОАО «Олкон»), а также Hg, поступающей в озеро не только со стоками медно-никелевого производства, но и в результате апатитонифелинового производства, о чем было сказано ранее [4]. Повышенные содержания Al и Sr в поверхностных слоях ДО в южной части Большой Имандры связаны с поступлением сточных вод ОАО «Апатит» [5]. В направлении стоковых течений в озере в плесе Йокостровская Имандра происходит уменьшение содержания исследуемых металлов, а в плесе Бабинская Имандра содержания металлов незначительно превышают или равны фоновым содержаниям, поэтому этот плес и принят условно фоновым, хотя влияние аэротехногенного загрязнения прослеживается и на этой акватории озера [6].

Таблица 1. Среднее содержания металлов (мкг/г сух. веса) в поверхностном (0-1 см) слое ДО, воде, органах и тканях сига различных плесов оз. Имандра.

Плес	Объект	Ni	Cu	Zn	Mn	Al	Sr	Hg
Большая Имандра Север	ДО	1523	287	104	28487	21361	286	0.089
	вода	6	4	1	22	29	54	н.о.
	мышцы	1.03	0.88	22	2.5	4.0	22.09	0.180
	печень	1.6	35.4	266	7.3	10.5	2.8	0.390
	почки	10.2	9.8	198	4.6	11.3	4.3	0.710
	жабры	2.1	2.5	397	30	14.8	210	0.330
	скелет	7.4	3.7	147	58.4	9.3	1199	0.160
Большая Имандра Центр	ДО	1860	370	131	10000	53500	1475	0.242
	вода	9	5	1	23	29	39	н.о.
	мышцы	0.52	1.15	15.5	1.07	0.77	4.73	0.140
	печень	1.01	58.13	153	7.5	4.5	1.4	0.180
	почки	6.8	6.0	114	2.9	8.5	5.6	0.220
	жабры	1.8	1.8	337	13.8	5.5	124	0.150
	скелет	2.2	0.4	105	40.5	2.6	577	0.030
Большая Имандра Юг	ДО	989	299	339	5600	48800	1980	0.267
	вода	6	4	1	14	86	74	н.о.
	мышцы	0.69	0.80	23	1.74	2.58	14.2	0.150
	печень	1.6	41.9	204	9.0	8.0	12.2	0.150
	почки	4.3	8.1	178	4.9	10.7	11.6	0.250
	жабры	2.8	2.7	411	29	101	210	0.110
	скелет	2.9	0.8	152	41	5.5	859	0.070
Йокостровская Имандра	ДО	766	203	101	11700	25000	609	0.154
	вода	5.25	3	1	13	26	60	н.о.
	мышцы	0.82	0.75	19.1	1.94	2.54	13.9	0.185
	печень	1.6	32	244	8.8	9.68	6.5	0.450
	почки	6.1	7.4	223	4.9	26.1	9.6	0.545
	жабры	2.2	2.2	446	20.0	20.2	159	0.205
	скелет	5.6	2.4	146	40	7.92	668	0.155
Бабинская Имандра	ДО	212	118	108	7600	23300	66	0.097
	вода	2	3	1	2.5	20	48	н.о.
	мышцы	0.79	0.80	20.8	1.95	5.08	14.4	0.215
	печень	1.32	47	230	8.77	7.71	2.27	0.430
	почки	4.74	8.13	278	4.83	41	6.62	0.630
	жабры	2.1	2.1	388	16.2	24.8	126	0.130
	скелет	5.5	2.1	148	24.6	5.4	529	0.070

Тяжелые металлы способны накапливаться в живых организмах в более высоких концентрациях, чем в окружающей среде. Содержание металлов в тканях рыб отражает динамику этих элементов в среде обитания и может быть использовано для мониторинга загрязнения окружающей среды, а также быть одним из показателей, раскрывающих причины наблюдаемых аномальных состояний отдельных особей и популяции в целом в условиях загрязнения водоема [7]. Количество металлов в органах и тканях рыб является переменной величиной, находящейся в тесной взаимосвязи с геохимическими условиями среды обитания, с генеративным и пластическим обменом и дру-

гими факторами [8]. Поглощение и аккумуляция тяжелых металлов рыбами зависит от химических и физических процессов в водоеме (в воде и на поверхности ДО). Сезонные изменения влияют на количество и доступность металлов.

По способности к аккумуляции Ni органы и ткани сига оз. Имандра располагаются в следующем порядке (табл. 1): почка > скелет > жабры > печень > мышцы. Несмотря на высокое содержание Ni в воде и ДО оз. Имандра, содержание этого тяжелого металла в органах и тканях сига не высокое (табл. 1). Ранее [8] также было отмечено, что наибольшей аккумулирующей способностью по отношению к Ni обладает почка рыб. Значения коэффициентов биологического накопления находятся в таком же порядке, что и их содержания в органах и тканях сига (табл. 2).

Таблица 2. Средние значения коэффициентов биологического накопления металлов в органах и тканях сига оз. Имандра по отношению к их содержанию в воде ($K_{\text{БН}}^{\text{ВОДА}}$) и ДО ($K_{\text{БН}}^{\text{ДО}}$).

Орган	Показатель	Ni	Cu	Zn	Mn	Al	Sr	Hg
мышцы	$K_{\text{БН}}^{\text{ДО}}$	0.0013	0.0039	0.16	0.00019	0.00012	0.066	1.3
	$K_{\text{БН}}^{\text{ВОДА}}$	180	230	20000	240	110	250	—
печень	$K_{\text{БН}}^{\text{ДО}}$	0.0023	0.19	1.8	0.00090	0.00029	0.012	2.6
	$K_{\text{БН}}^{\text{ВОДА}}$	320	11500	220000	1100	270	82	—
почка	$K_{\text{БН}}^{\text{ДО}}$	0.0090	0.037	1.6	0.00048	0.00074	0.028	4.0
	$K_{\text{БН}}^{\text{ВОДА}}$	1300	2200	199000	600	770	140	—
жабры	$K_{\text{БН}}^{\text{ДО}}$	0.0036	0.010	3.1	0.0023	0.00095	0.62	1.5
	$K_{\text{БН}}^{\text{ВОДА}}$	490	630	396000	2400	780	3000	—
скелет	$K_{\text{БН}}^{\text{ДО}}$	0.0085	0.0092	1.1	0.0040	0.00023	2.8	0.78
	$K_{\text{БН}}^{\text{ВОДА}}$	1200	540	140000	4050	210	14200	—

Медь содержится в наибольших количествах в печени (табл. 1), что было отмечено в [8]. По содержанию Cu органы сига оз. Имандра располагаются в следующем порядке (табл. 1): печень > почка > жабры > скелет > мышцы. Содержание Cu в печени сига более, чем на порядок больше, чем Ni. Значения $K_{\text{БН}}^{\text{ДО}}$ для Cu располагаются в том же порядке, что и содержание в органах и тканях сига (табл. 2), причем эти значения намного больше, чем для Ni (за исключением скелета).

Уровень накопления Zn в органах и тканях сига оз. Имандра довольно высокий, несмотря на относительно низкое содержание этого тяжелого металла в воде и ДО озера. По концентрации Zn органы сига оз. Имандра располагаются в следующем порядке (табл. 1): жабры > печень > почка > скелет > мышцы. Подобный порядок аккумуляции Zn в органах и тканях сига оз. Имандра был отмечен ранее [1], но содержание этого металла в органах сига в последние годы снижается. Значения $K_{\text{БН}}^{\text{ДО}}$ для Zn больше 1 практически для всех органов (кроме мышц), а значения $K_{\text{БН}}^{\text{ВОДА}}$ исчисляются сотнями тысяч, что говорит о значительном накоплении в органах и тканях сига этого эссенциального элемента.

По аккумуляции Mn органы сига оз. Имандра располагаются в следующем порядке (табл. 1): скелет > жабры > печень > почка > мышцы. Наибольшее количество Mn в скелете, жабрах и мышцах сига накопилось на севере Большой Имандры, куда длительное время поступали стоки железорудного производства с ОАО «Олкон», где отмечаются максимальные содержания сопутствующего этому производству Mn в воде и ДО. Значения коэффициента корреляции содержания Mn в скелете и воде и ДО достигает достоверной величины и равно 0.82. Эта закономерность в оз. Имандра отмечена ранее [1]. Коэффициенты биологического накопления Mn в организме сига не высокие и минимальны среди всех исследуемых металлов и располагаются в том же порядке среди органов, что и их аккумуляция (табл. 2).

По содержанию Al органы сига оз. Имандра располагаются в следующем порядке (табл. 1): жабры > почка > печень > скелет > мышцы. Отмечена высокая степень зависимости содержания Al

в жабрах от концентрации в воде ($r = 0.95$), что было отмечено ранее [8], и связывается с процессами его осаждения на жабрах при фильтрации воды. Наибольшее содержание Al в жабрах сига обнаружено в южной части Большой Имандры, куда поступают стоки апатитонефелинового производства, содержащие высокие концентрации Al (табл. 1). Коэффициенты биологического накопления Al в организме сига невысокие и минимальны среди всех исследуемых металлов (наряду с Mn) и располагаются в том же порядке среди органов, что и их аккумуляция (табл. 2).

Участие Sr в обменных процессах в костной ткани приводит к интенсивной аккумуляции этого металла в скелете рыб, в том числе и сига [1, 8]. По способности к аккумуляции Sr органы и ткани сига оз. Имандра располагаются в следующем порядке (табл. 1): скелет > жабры > мышцы > почка > печень. Со стоками апатитонефелинового производства в южную часть Большой Имандры Sr в больших количествах поступает в воду и ДО. Обладая большой биофильностью Sr характеризуется высокой величиной КБН_{до} в скелете сига – 2.8 (табл. 2.)

Ввиду крайне низких содержаний в воде, загрязнение Hg можно выявить преимущественно на основе изучения ее содержания в ДО и рыбах. По концентрации Hg органы сига оз. Имандра располагаются в следующем порядке (табл. 1): почка > печень > жабры > мышцы > скелет. Подобная закономерность была отмечена ранее в Умбозере [9]. Значения КБН_{до} по Hg (табл. 2) практически для всех органов выше единицы (кроме скелета), что говорит о высокой аккумуляционной способности этого токсичного металла.

Литература

1. Моисеенко Т.И., Даувальтер В.А., Лукин А.А. и др. (Под ред. Моисеенко Т.И.) Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. М.: Наука. 2002. 487 с.
2. Даувальтер В.А. Закономерности осадконакопления в водных объектах Европейской субарктики (природоохранные аспекты проблемы) // Автореф. дис. д.г.н. Апатиты: КНЦ РАН. 1999. 52 с.
3. Даувальтер В.А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Изд-во Мурманского гос. техн. ун-та. 2012. 242 с.
4. Даувальтер В.А., Кашулин Н.А. Ртуть в донных отложениях озера Имандра в зоне влияния стоков разработки апатитонефелиновых месторождений // Тр. Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2014. № 11. С. 70-75.
5. Даувальтер В.А., Кашулин Н.А. Реконструкция накопления элементов в озере Имандра как отражение динамики качества воды // Тр. Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2016. № 13. С. 218-221.
6. Даувальтер В.А., Кашулин Н.А. Современное экологическое состояние озера Имандра // Север и Арктика в новой парадигме мирового развития. Лузинские чтения – 2016. Апатиты: ИЭП КНЦ РАН. 2016. С. 197-204.
7. Кашулин Н.А., Даувальтер В.А., Кашулина Т.Г. и др. Антропогенные изменения лотических экосистем Мурманской области. Ч. 1. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. 2005. 234 с.
8. Моисеенко Т.И. Влияние геохимических факторов водной среды на биоаккумуляцию металлов в организме рыб // Геохимия. 2015. № 3. С. 222-233.
9. Даувальтер В.А., Кашулин Н.А. Халькофильные элементы (Hg, Cd, Pb, As) в озере Умбозеро, Мурманская область // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. № 4. С. 461-476.