

УДК 574.5:546.49 (285.32)(292.471)

## Ртуть в абиотических и биотических компонентах экосистем соленых озер Крыма

Стецюк А. П., Поповичев В. Н., Мирзоева Н. Ю., Родионова Н. Ю., Богданова Т. А.

Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского  
Севастополь, Россия  
Alex-ra-777@mail.ru

Выполнено исследование по распределению концентрации ртути в различных компонентах 10 соленых озер Крыма в зависимости от гидрохимических показателей и значений первичной продукции в воде исследуемых водоемов. Определено, что в соленых озерах Керченской группы, находящихся в районах грязевого вулканизма, ртуть была представлена преимущественно растворенной формой, тогда как в воде озер Перекопской, Тарханкутской и Евпаторийской групп преобладала взвешенная форма ртути. Отмечена слабая связь различных форм ртути с такими гидрохимическими показателями, как рН, S (‰) и T (°C). Выявлена опосредованная связь биогенных элементов с содержанием ртути в воде исследуемых водоемов. Минеральные формы фосфора, азота и кремния обуславливали развитие взвешенного вещества (зоо- и фитопланктона), которое накапливало ртуть, способствуя в последующем ее элиминации в донные отложения водоемов. Получено, что основным биогенным элементом, лимитировавшим первичную продукцию летом 2017 года в большинстве озер Крыма, являлся фосфор. Определена достоверная зависимость между суммой минеральных форм азота ( $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) и коэффициентом накопления ртути цистами и взрослыми особями *Artemia*. Общее содержание ртути (суммарно растворенная и взвешенная формы) в воде водоемов превышало ПДК ( $500 \text{ нг} \times \text{л}^{-1}$  – для водоемов хозяйственно-питьевого и культурного водопользования) только в воде озер Тобечикского и Красного. Это было обусловлено использованием озера Красного Крымским содовым заводом в качестве накопителя-испарителя, тогда как превышение концентрации ртути в озере Тобечикском связываем с природным фактором его расположения в местах грязевого вулканизма.

*Ключевые слова:* ртуть, взвесь, донные осадки, соленые озера Крыма.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее опасных загрязнителей природных вод является ртуть, которая относится к высокотоксичным тяжелым металлам. В ряду молярной токсичности тяжелых металлов для водных организмов ртуть занимает первое место:  $\text{Hg} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Fe} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{Co} > \text{Mn}$  (Холопов, 2003). Все соединения ртути высокотоксичны для водных растений. Концентрация хлорида ртути, равная  $0,002\text{--}0,250 \text{ мг} \times \text{л}^{-1}$ , вызывает у растений задержку роста (Мур, Рамамурти, 1987). Многими гидробионтами ртуть аккумулируется до концентраций, превышающих предельно допустимые уровни (ПДК). Также известно, что в природных водах ртуть интенсивно связывается с твердыми взвешенными частицами и независимо от природы взвешенного вещества при размере частиц от  $0,45$  до  $20 \text{ мкм}$  с взвесью связывается примерно в  $10^5$  раз больше ртути по сравнению с ее количеством, остающимся в растворе (Мур, Рамамурти, 1987). За счет седиментации взвесей происходит накопление ртути в донных осадках. Сброс промышленных отходов в водоемы может вызвать увеличение уровня содержания ртути в донных отложениях на 2–4 порядка. Период полного выведения ртути из глинистой фракции донных отложений оценивается десятками тысяч лет (Лапердина, 2000), поэтому послойное исследование керн донных осадков позволяет оценить хроническое поступление ртути в водные объекты, в том числе и в соленые озера Крыма.

Цель работы состояла в изучении особенностей распределения концентрации ртути в абиотических и биотических компонентах соленых озер Крыма, выявлении наличия зависимостей между концентрациями различных форм ртути и гидрохимическими

параметрами воды исследуемых водоемов, а также величиной первичной продукции (ПП) фитопланктона.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

– определить концентрацию ртути в абиотических (вода, донные отложения, взвешенное вещество) и биотических (водные растения, *Artemia* sp.) компонентах соленых озер Крыма;

– установить значения гидрохимических параметров и ПП в воде исследуемых водоемов;

– найти математическое выражение возможных связей между различными формами ртути, гидрохимическими параметрами, ПП в воде соленых озер Крыма;

– получить величины коэффициентов детерминации ( $R^2$ ) как показателей достоверности полученных аппроксимаций, по которым в регрессионных моделях возможно оценить тесноту связи между рассматриваемыми параметрами.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объекты исследования и координаты станций отбора проб в соленых озерах Крыма представлены на рисунке 1 и в таблице 1. Для исследования содержания ртути в озерах было отобрано 9 проб воды, разделенной на фильтрат и взвесь, 4 колонки донных отложений, разрезанных на слои по два сантиметра, 4 вида гидробионтов. Для исследования гидрохимических параметров и первичной продукции было отобрано по 9 проб воды.

Для разделения форм ртути отобранные пробы воды фиксировали на месте отбора концентрированной азотной кислотой (10 мл  $\text{HNO}_3$  на 1 л воды) и уже в лаборатории пробы воды фильтровали через предварительно взвешенные нуклеопоровые фильтры с диаметром пор 0,45 мкм. В фильтрате анализировали растворенную форму ртути, а на фильтрах – взвешенную.



Рис. 1. Карта-схема отбора проб в соленых озерах Крыма

Пробы донных осадков, взвеси и гидробионтов обрабатывали в лабораторных условиях в соответствии с ГОСТ 26927-86. Анализ проб на содержание ртути проводили методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии с помощью ртутного анализатора «Хиранума-1» в ИМБИ им. А. О. Ковалевского РАН, г. Севастополь. Для калибровки прибора и контроля качества анализа использовали аттестационные стандартные образцы ртути. Ошибка измерения не превышала 2 %.

Степень загрязнения озер ртутью оценивали согласно соответствующим инструкциям (Перечень..., 1995; СаНПиН ..., 2001; Neue Niederlandische Liste, 3/95). При отборе проб воды непосредственно определяли ее соленость, температуру и рН. Остальные гидрохимические параметры воды определяли в сертифицированной гидрохимической лаборатории отдела аквакультуры и морской фармакологии ИМБИ им. А. О. Ковалевского РАН, руководствуясь соответствующими методиками (Руководство..., 1977).

*Таблица 1*

Станции отбора проб и объекты исследования в соленых озерах Крыма

Место отбора проб и объекты исследования	Дата отбора проб	Координаты	
Озеро Киятское (вода, донные осадки)	23.06.2017	45°58.684'N	33°54.572'E
Озеро Кирлеутское (вода, донные осадки, цисты <i>Artemia</i> )	22.06.2017	45°55.479'N	34°02.730'E
Озеро Красное (вода)	23.06.2017	45°59.275'N	33°53.110'E
Озеро Бакальское (вода, <i>Polysiphonia</i> sp.)	14.07.2017	45°44.004'N	33°10.246'E
Озеро Джарылгач (вода, взрослые особи <i>Artemia</i> )	14.07.2017	45°26.296'N	33°11.773'E
Озеро Кызыл-Яр (вода, донные осадки)	28.07.2017	45°03.982'N	33°37.782'E
Озеро Сасык-Сиваш (вода)	28.07.2017	45°09.280'N	33°30.680'E
Озеро Тобечикское (вода, донные осадки)	16.08.2017	45°09.238'N	36°22.623'E
Озеро Акташское (вода, донные осадки, взрослые особи <i>Artemia</i> )	16.08.2017	42°23.144'N	35°50.036'E

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Воды озер, как и другие природные воды, характеризуются различным химическим составом и разной степенью минерализации. По составу солей озера подразделяются на три типа: карбонатные, сульфатные и хлоридные. По количеству растворенных веществ (по степени минерализации) выделяют четыре типа озер: пресные, солоноватые, соленые и минеральные. Пресные озера – соленость не превышает 1 ‰, солоноватые – от 1 до 24 ‰, соленые – от 25 до 47 ‰, минеральные – свыше 47 ‰. Примером пресного озера может служить Байкал, соленость которого составляет 0,1 ‰, солоноватого – Каспийское море (12–13 ‰), а минеральных (или пересоленных) – Большое Соленое озеро (137–300 ‰) и Мертвое море с соленостью 260–270 ‰, а в отдельные годы – до 310 ‰ (Озеро ..., 2018).

В таблице 2 представлены гидрохимические показатели и значения первичной продукции фитопланктона соленых озер Крыма. Практически все исследованные нами озера являются гиперсолеными, за исключением оз. Кызыл-Яр, опресненного в результате длительного воздействия Северо-Крымского канала (до 2014 года). Из девяти исследованных озер большинство обладает слабощелочной средой (рН=7,2–8,2): Бакальское, Джарылгач, Кызыл-Яр, Сасык-Сиваш, Акташское. Сильнощелочная среда (рН=9,6)

характерна для озера Красного, служащего отстойником для сточных вод Крымского содового завода.

Таблица 2

Гидрохимические показатели воды соленых озер и первичная продукция (ПП)

Название озера	Соленость, ‰	pH	T, °C воды	ПП, мгС/м <sup>3</sup> /сутки
Киятское	262,9	7,4	31,3	6,1
Кирлеутское	187,9	7,2	30,1	4,6
Красное	341,1	9,6	30,2	0,0
Бакальское	65,0	8,2	26,3	227,8
Джарылгач	137,0	8,0	27,9	3,4
Кызыл-Яр	1,9	7,8	29,8	894,9
Сасык-Сиваш	309,0	7,5	33,3	58,9
Тобечикское	364,0	7,2	29,7	30,7
Акташское	217,0	7,7	28,8	30,0

В ходе работы было исследовано содержание в воде минеральных форм азота и фосфора (табл. 3), являющихся основными биогенными элементами, влияющими на биопродуктивность вод. Соединения азота могут попадать в озера со сточными водами, с дождевой водой, вследствие выщелачивания из почвы. Нитриты находятся в водах в виде нитрит-анионов ( $\text{NO}_2^-$ ) и являются промежуточным звеном биологического окисления аммиака до нитрат-анионов ( $\text{NO}_3^{2-}$ ). Аммоний-ион ( $\text{NH}_4^+$ ) образуется при биохимическом распаде азотсодержащих органических соединений. Повышенное содержание аммония в озерах Акташском ( $7847,0 \text{ мкг} \times \text{л}^{-1}$ ) и Тобечикском ( $6431,0 \text{ мкг} \times \text{л}^{-1}$ ), возможно, связано с расположением их на площадях грязевого вулканизма Керченского полуострова. Соединения фосфора содержатся во всех живых организмах, влияя на процессы метаболизма. Увеличение концентрации фосфатов может привести к эвтрофикации озер. Нами зафиксировано повышенное содержание фосфат-ионов ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) в воде озера Тобечикского ( $4941,2 \text{ мкг} \times \text{л}^{-1}$ ). Интересно отметить, что линия тренда ( $R^2=0,43$ ), полученная в регрессионном анализе, показывающего взаимосвязь между летними значениями концентраций фосфатов и всего азотного минерального комплекса в исследуемых озерах (табл. 3), дает качественную оценку силы связи по шкале Чеддока (Шкала Чеддока, 2018), что косвенно указывает на общность источников поступления этих биогенов в воду.

Кремний, тоже относящийся к биогенам, имеет также важное значение для развития водных организмов, особенно диатомовых водорослей, которые используют его для построения своего скелета, и во время их массового развития содержание кремния в воде может резко падать. После же их отмирания часть кремния минерализуется и вновь используется, другая часть (более грубые панцири) оседает на дне водоемов. Содержание кремния в разных водах неодинаково: в реках его больше, чем в озерах, а в придонных горизонтах больше, чем в поверхностных. В пресных водах оно колеблется от десятых долей до 2–6, достигая иногда  $10 \text{ мг} \times \text{л}^{-1}$  (Химические показатели..., 2018). Во всех исследованных нами озерах концентрация кремния была приурочена к диапазону от 0,7 до  $6,2 \text{ мг} \times \text{л}^{-1}$  (табл. 3). При этом содержание его в Перекопской группе озер было ниже, чем в озерах Тарханкутской, Евпаторийской и Керченской групп. Наименьшее содержание кремния ( $681,5 \text{ мкг} \times \text{л}^{-1}$ ) было отмечено в озере Красном, имеющем при этом сильнощелочную среду и полное отсутствие первичной продукции фитопланктона (табл. 2).

Таблица 3

Содержание и соотношение биогенных элементов в воде озер Крыма

Название озера	$\text{NO}_2^-$ , мкг×л <sup>-1</sup>	$\text{NO}_3^{2-}$ , мкг×л <sup>-1</sup>	$\text{NH}_4^+$ , мкг×л <sup>-1</sup>	$\text{PO}_4^{3-}$ , мкг×л <sup>-1</sup>	Si, мкг×л <sup>-1</sup>	Соотношение $\Sigma\text{N}:\text{PO}_4^{3-}$ по массе (в мкМ)	Атомарное соотношение N:P
Киятское	9,8	174,3	86,7	75,3	1364,4	8,0	9,9
Кирлеутское	6,1	26,6	165,8	43,1	753,4	10,2	21,5
Красное	800,7	28824,9	251,9	837,6	681,5	79,0	56,2
Бакальское	18,0	290,2	660,8	42,1	2995,3	51,0	94,0
Джарылгач	3,8	1084,3	1675,0	14,7	5458,1	415,7	713,1
Кызыл-Яр	5,8	125,1	578,2	28,0	6155,5	56,0	115,9
Сасык-Сиваш	18,7	248,1	371,7	52,6	1939,7	26,9	45,1
Тобечикское	122,4	673,0	6431,0	4941,2	5871,8	3,2	7,1
Акташское	0,0	596,5	7847,0	210,3	4420,3	88,9	200,7

В результате накопления в воде биогенных элементов происходит повышение биологической продуктивности вод (эвтрофирование), в котором определяющий вклад обуславливают два главных биогенных элемента: азот и фосфор. Если N:P (отношение содержания минерального азота к содержанию минерального фосфора, выраженных в микромолях) меньше 10, то первичная продукция лимитируется азотом, при N:P>17 – фосфором, при N:P=10–17 азотом и фосфором одновременно (Батян и др., 2009). Также критерием, позволяющим выявить лимитирующий фактор, является атомарное соотношение Редфилда (106C:16N:1P), согласно которому воды делятся на азот-лимитированные (N:P<16) и фосфор-лимитированные (N:P>16) (Redfield, 1958). Оценка лимитации биогенными элементами первичной продукции, проведенная нами на основе гидрохимических наблюдений за содержанием совокупности аммонийного, нитритного и нитратного азота по отношению к минеральному фосфору, показала, что основным биогенным, лимитирующим первичное продуцирование, в большинстве озер Крыма является фосфор (табл. 3), так как для них и атомарное и весовое соотношение N:P более 16. Полученные результаты соответствуют закону минимума Либиха, в соответствии с которым, определяющим является тот экологический фактор, который в наибольшей степени отклоняется от своего оптимального значения.

Статистическая обработка результатов экспедиционных съемок включала определение линейных и степенных зависимостей в регрессионных уравнениях между исследованными параметрами и величины достоверности их аппроксимации ( $R^2$ ). При этом наблюдалась слабая взаимосвязь различных форм ртути с такими гидрохимическими показателями, как pH, S (‰) и T (°C). При степенном характере взаимосвязи наибольшая величина достоверности аппроксимации ( $R^2=0,906$ ) была выявлена между суммой минеральных форм азота ( $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) и коэффициентом накопления ртути *Artemia* (табл. 4). Также установлена высокая достоверность аппроксимации степенной функцией взаимосвязи между взвешенной формой ртути ( $\text{нг}\times\text{г}^{-1}$ ) и  $\text{PO}_4^{3-}$  ( $R^2=0,710$ ). Линейный характер взаимосвязи с высоким значением ( $R^2=0,858$ ) наблюдался между растворенной формой

ртути ( $\text{нг}\times\text{л}^{-1}$ ) и  $\text{PO}_4^{3-}$ , и, согласно литературным данным, токсичность часто коррелирует с содержанием фосфатов (Мур, Рамамурти, 1987).

Таблица 4

Результаты корреляционного анализа абиотических и биотических компонентов соленых озер Крыма

Анализируемые параметры, между которыми устанавливалась взаимосвязь	Величина достоверности аппроксимации	
	линейная	степенная
1	2	3
Первичная продукция ( $\text{мгС}/\text{м}^3/\text{сут}$ ), растворенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{л}^{-1}$ )	$y = -0,141x + 316,7$ $R^2=0,054$	$y = 388,7x^{-0,05}$ $R^2=0,018$
Первичная продукция ( $\text{мгС}/\text{м}^3/\text{сут}$ ), взвешенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{л}^{-1}$ )	$y = -1,506x + 579,8$ $R^2=0,081$	-
Первичная продукция ( $\text{мгС}/\text{м}^3/\text{сут}$ ), взвешенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{г}^{-1}$ )	<b><math>y = 0,069x - 94,56</math></b> <b><math>R^2=0,822</math></b>	-
Первичная продукция ( $\text{мгС}/\text{м}^3/\text{сут}$ ), коэффициент накопления ( $K_n$ ) ртути взвесью	<b><math>y = 0,009x - 94,56</math></b> <b><math>R^2=0,822</math></b>	-
Первичная продукция ( $\text{мгС}/\text{м}^3/\text{сут}$ ), рН	$y = -1\text{E}-05x - 7,846$ $R^2=2\text{E}-05$	-
Первичная продукция ( $\text{мгС}/\text{м}^3/\text{сут}$ ), $\text{NO}_2^-$ , $\text{мкг}\times\text{л}^{-1}$	$y = -0,180x - 134,6$ $R^2=0,04$	-
Первичная продукция ( $\text{мгС}/\text{м}^3/\text{сут}$ ), $\text{NO}_3^{2-}$ , $\text{мкг}\times\text{л}^{-1}$	$y = -6,206x + 4426$ $R^2=0,036$	-
Первичная продукция ( $\text{мгС}/\text{м}^3/\text{сут}$ ), $\text{NH}_4^+$ , $\text{мкг}\times\text{л}^{-1}$	$y = -2,039x + 2292$ $R^2=0,04$	<b><math>y = 66,88x^{1,656}</math></b> <b><math>R^2=0,584</math></b>
Первичная продукция ( $\text{мгС}/\text{м}^3/\text{сут}$ ), $\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{мкг}\times\text{л}^{-1}$	$y = -0,989x + 831,9$ $R^2=0,032$	-
Первичная продукция ( $\text{мгС}/\text{м}^3/\text{сут}$ ), Si, $\text{мкг}\times\text{л}^{-1}$	$y = 3,677x - 2780$ $R^2=0,232$	<b><math>y = 637,0x^{0,955}</math></b> <b><math>R^2=0,622</math></b>
рН, растворенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{л}^{-1}$ )	$y = -0,002x + 8,222$ $R^2=0,071$	$y = 9,687x^{-0,04}$ $R^2=0,038$
рН, взвешенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{л}^{-1}$ )	$y = 0,009x - 5,143$ $R^2=0,472$	$y = 1,279x^{0,319}$ $R^2=0,42$
рН, взвешенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{г}^{-1}$ )	$y = 9\text{E}-06x + 7,814$ $R^2=0,002$	$y = 6,945x^{0,016}$ $R^2=0,082$
$\text{NO}_2^-$ , $\text{мкг}\times\text{л}^{-1}$ , растворенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{л}^{-1}$ )	$y = -0,012x + 111,5$ $R^2=2\text{E}-05$	-
$\text{NO}_2^-$ , $\text{мкг}\times\text{л}^{-1}$ , взвешенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{л}^{-1}$ )	$y = 3,334x + 864,7$ $R^2=0,493$	-
$\text{NO}_2^-$ , $\text{мкг}\times\text{л}^{-1}$ , взвешенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{г}^{-1}$ )	$y = -0,014x + 156,7$ $R^2=0,041$	-
$\text{NO}_3^{2-}$ , $\text{мкг}\times\text{л}^{-1}$ , растворенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{л}^{-1}$ )	$y = -13,31x + 5867$ $R^2=0,016$	$y = 9,389x^{0,755}$ $R^2=0,026$
$\text{NO}_3^{2-}$ , $\text{мкг}\times\text{л}^{-1}$ , взвешенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{л}^{-1}$ )	$y = 125x - 32968$ $R^2=0,529$	$y = 7\text{E}-15x^{6,831}$ $R^2=0,415$
$\text{NO}_3^{2-}$ , $\text{мкг}\times\text{л}^{-1}$ , взвешенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{г}^{-1}$ )	$y = -0,405x + 4920$ $R^2=0,026$	$y = 3429x^{-0,28}$ $R^2=0,055$
$\text{NH}_4^+$ , $\text{мкг}\times\text{л}^{-1}$ , растворенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{л}^{-1}$ )	$y = 22,99x - 1977$ $R^2=0,496$	$y = 0,0x^{2,687}$ $R^2=0,508$
$\text{NH}_4^+$ , $\text{мкг}\times\text{л}^{-1}$ , взвешенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{л}^{-1}$ )	$y = -11,32x - 5316$ $R^2=0,044$	$y = 7\text{E}+10x^{-2,9}$ $R^2=0,113$
$\text{NH}_4^+$ , $\text{мкг}\times\text{л}^{-1}$ , взвешенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{г}^{-1}$ )	$y = -0,327x - 3105$ $R^2=0,175$	$y = 46460x^{-0,56}$ $R^2=0,339$
$\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{мкг}\times\text{л}^{-1}$ , растворенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{л}^{-1}$ )	<b><math>y = 16,43x - 2154</math></b> <b><math>R^2=0,858</math></b>	<b><math>y = 5\text{E}-06x^{3,324}</math></b> <b><math>R^2=0,551</math></b>

*Ртуть в абиотических и биотических компонентах экосистем соленых озер Крыма*

$\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{мкг}\times\text{л}^{-1}$ , взвешенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{л}^{-1}$ )	$y = -4,767x - 2087$ $R^2=0,026$	$y = 3E-05x^{2,678}$ $R^2=0,068$
---	-------------------------------------	-------------------------------------

Продолжение табл. 4

1	2	3
$\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{мкг}\times\text{л}^{-1}$ , взвешенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{г}^{-1}$ )	$y = -0,157x - 1221$ $R^2=0,136$	<b><math>y = 14738x^{-0,97}</math></b> <b><math>R^2=0,710</math></b>
$\text{Si}$ , $\text{мкг}\times\text{л}^{-1}$ , растворенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{л}^{-1}$ )	$y = 13,72x - 915,2$ $R^2=0,313$	$y = 5,507x^{1,205}$ $R^2=0,328$
$\text{Si}$ , $\text{мкг}\times\text{л}^{-1}$ , взвешенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{л}^{-1}$ )	$y = -22,99x + 10014$ $R^2=0,324$	$y = 1E+09x^{-2,34}$ $R^2=0,237$
$\text{Si}$ , $\text{мкг}\times\text{л}^{-1}$ , взвешенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{г}^{-1}$ )	$y = 0,219x - 2556$ $R^2=0,140$	$y = 5137x^{-0,09}$ $R^2=0,032$
$\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^{2-} + \text{NH}_4^+$ , S, %о воды	$y = 37,96x - 2277$ $R^2=0,242$	$y = 429,8x^{0,285}$ $R^2=0,077$
$\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^{2-} + \text{NH}_4^+$ , рН воды	<b><math>y = 10624x - 77806</math></b> <b><math>R^2=0,677</math></b>	$y = 5E-08x^{11,8}$ $R^2=0,382$
$\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^{2-} + \text{NH}_4^+$ , взвешенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{л}^{-1}$ )	$y = 117,0x - 28516$ $R^2=0,453$	$y = 4E-06x^{3,514}$ $R^2=0,139$
$\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^{2-} + \text{NH}_4^+$ , $K_n$ ртути взвесью	$y = -0,145x - 9109$ $R^2=0,118$	$y = 89496x^{-0,43}$ $R^2=0,238$
$\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^{2-} + \text{NH}_4^+$ , $K_n$ ртути цистами и взрослыми особями артемий	<b><math>y = -0,029x - 242,7</math></b> <b><math>R^2=0,770</math></b>	<b><math>y = 15067x^{-0,719}</math></b> <b><math>R^2=0,906</math></b>

Содержание растворенной, взвешенной и общей (суммарной) форм ртути в воде изучаемых объектов представлено на рисунке 3.



Рис. 3. Содержание общей (суммарной) формы ртути в соленых озерах Крыма

В озерах Тобечикское и Акташское доминировала растворенная форма ртути. Полученные результаты показали (рис. 3), что наибольшая концентрация общей формы ртути с превышением ПДК ( $500 \text{ нг}\times\text{л}^{-1}$  – для водоемов хозяйственно-питьевого и культурного водопользования) была в озерах Красном и Тобечикском. Данные результаты могут быть следствием того, что озеро Красное длительное время подвергалось антропогенному воздействию в результате работы Крымского содового завода, а озеро Тобечикское расположено в местах грязевого вулканизма Керченского полуострова, где, как

известно, установлена повышенная эманация ртути (Геология СССР, 1974), а в остальных озерах превалировала взвешенная форма ртути ( $\text{нг}\times\text{л}^{-1}$ ): Киятское, Кирлеутское, Красное, Бакальское, Джарылгач, Кызыл-Яр, Сасык-Сиваш. Делением концентрации взвешенной формы ртути ( $\text{нг}\times\text{л}^{-1}$ ) на вес взвеси была получена удельная концентрация взвешенной формы ртути  $C_{\text{взв}}$  ( $\text{нг}\times\text{г}^{-1}$ ). Коэффициенты накопления ( $K_n$ ) ртути взвесью рассчитывали по формуле:

$$K_n = C_{\text{взв}} / C_v, \quad (1)$$

где  $C_{\text{взв}}$  ( $\text{нг}\times\text{г}^{-1}$ ) и  $C_v$  ( $\text{нг}\times\text{мл}^{-1}$ ) – концентрация ртути во взвеси (на сухой вес) и концентрация растворенной ртути в воде (Поликарпов, 1964). Диапазон  $K_n$  (рис. 4), составил от 131 до 69444. Наименьшее значение  $K_n$  было отмечено для оз. Тобечикского, а наибольшее для оз. Кызыл-Яр.

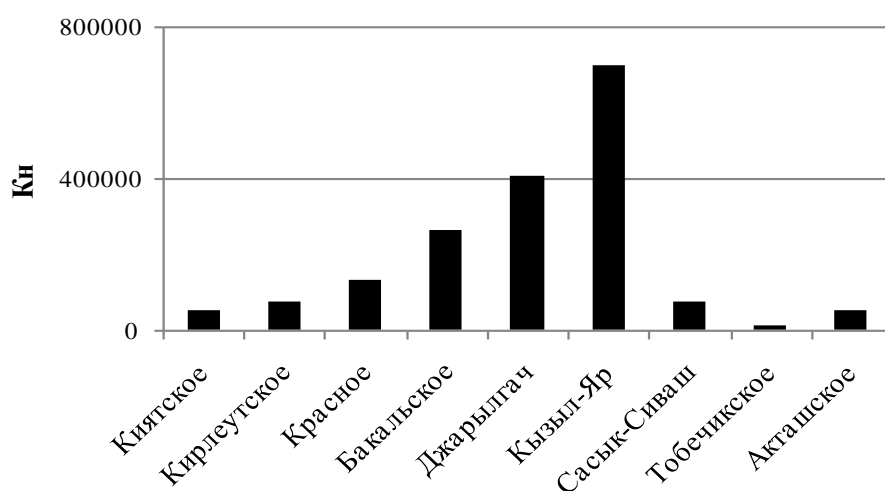


Рис. 4. Коэффициенты накопления ртути взвешенным веществом

Исходя из данных, представленных в табл. 5 и на рис. 3 и 5, также были рассчитаны, согласно выражению 2, коэффициенты накопления ртути гидробионтами, отобранными в экспедициях (цисты и взрослые особи *Artemia* sp. и *Polysiphonia* sp.):

$$K_n = C_z / C_v, \quad (2)$$

где  $C_z$  ( $\text{нг}\times\text{г}^{-1}$ (сыр)) и  $C_v$  ( $\text{нг}\times\text{г}^{-1}$ ) – концентрация ртути в гидробионте (на сырой вес) и концентрация растворенной ртути в водной среде соответственно. Полученные значения  $K_n$  представлены в таблице 5.

Как известно, коэффициенты накопления на основе сырого веса отражают действительную роль живых гидробионтов в концентрировании химических элементов из водных растворов (Поликарпов, 1964). Наибольшее значение  $K_n$  отмечено у цист *Artemia* (290), а наименьшее ( $K_n=16$ ) – у взрослых особей этого жаброногого рачка (табл. 5). Отмечено, что концентрации ртути во взрослых особях артемии, как и в водной растительности, были в 3,2–9,6 раз ниже, чем в цистах этого жаброногого рачка, независимо от уровня содержания ртути в воде.  $K_n$  ртути цистами был значительно выше, чем его значения для взрослых особей артемий и водных растений, и составлял 290 единиц. Это можно объяснить адсорбцией ртути защитной оболочкой цист, имеющей за счет малых



размеров относительно большую по сравнению с взрослыми артемиями удельную поверхность, активно сорбирующей этот токсикант.

Таблица 5

Концентрация и коэффициенты накопления ( $K_n$ ) ртути в гидробионтах

Место отбора проб (название озера)	Наименование гидробионта	$C_2$ , $\text{нг} \times \text{г}^{-1}$ (сыр. вес)	$K_n$
Кирлеутское	Цисты <i>Artemia</i>	29,0	290,0
Бакальское	<i>Polysiphonia sp.</i>	7,6	47,5
Джарылгач	Взрослые особи <i>Artemia</i>	9,2	83,6
Акташское	Взрослые особи <i>Artemia</i>	3,2	16,0

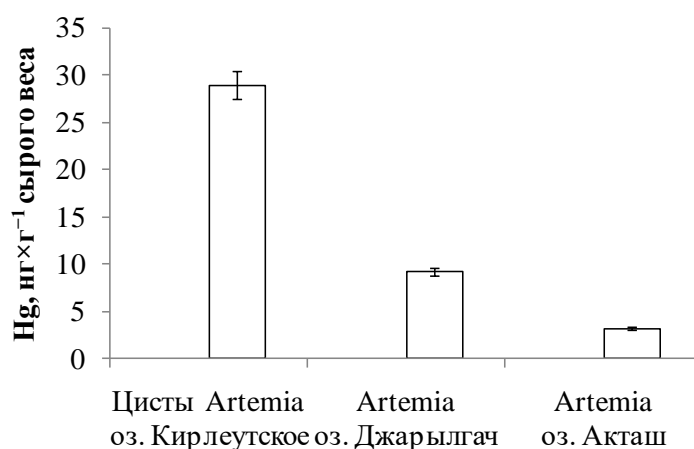


Рис. 5. Концентрации ртути в гидробионтах

Также нами были изучены донные осадки озер Кызыл-Яр, Чокрак, Тобечикского, Акташского (рис. 6). Содержание ртути в исследованных слоях донных отложений, разрезанных послойно (0–2 см), не превышало установленной степени загрязнения ( $300 \text{нг} \times \text{г}^{-1}$ ) (Neue Niederlandische Liste, 3/95).

