



$$d(t) = -\frac{dN}{dt} \cdot \frac{1}{N}$$

где  $N$  и  $dN/dt$ —соответственно численность и абсолютная скорость уменьшения численности животных в момент времени  $t$ .

Средняя удельная смертность организмов ( $d$ , сут<sup>-1</sup>) в эксперименте рассчитывалась по формуле [1]:

$$d = \frac{\ln N_1 - \ln N_2}{t_2 - t_1}$$

где  $N_1$  и  $N_2$ —численность животных в последовательные моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  (сут). Расчет летальных концентраций ионов металлов проводился по схеме, предложенной нами ранее\*.

**Результаты и обсуждение.** Анализ полученных данных (рис. 1—3) показал, что величины удельной смертности гаммарусов при низких концентрациях ионов меди (до 0,04 мг/л), цинка (до 0,1 мг/л) и кобальта (до 0,8 мг/л) статистически не отличаются от контрольных и составляют  $0,077 \pm 0,017$ ,  $0,082 \pm 0,020$  и  $0,075 \pm 0,019$  сут<sup>-1</sup> соответственно. В диапазоне более высоких концентраций меди (0,05—0,18 мг/л), цинка (0,12—1,4 мг/л) и кобальта (1—40 мг/л) зависимости удельной смертности рачков от концентраций ионов металлов в растворе ( $C$ , мг/л) хорошо аппроксимируются следующими степенными функциями:

для ионов меди

$$d = 1890 \cdot C^{3,45} \quad (2)$$

для ионов цинка

$$d = 1,28 \cdot C^{1,13} \quad (3)$$

для ионов кобальта

$$d = 1,125 \cdot C^{0,571} \quad (4)$$

Удельная смертность рачков, рассчитанная по уравнениям (2)—(4), обусловлена не только гибелью животных в результате токсического действия ионов металлов, но и смертностью, связанной с условиями их содержания в эксперименте. Поэтому удельная смертность, обусловленная только токсическим действием ионов меди ( $d_{Cu}$ ), цинка ( $d_{Zn}$ ), кобальта ( $d_{Co}$ ) представляет собой разность между величинами, рассчитанными по уравнениям (2)—(4) и удельной смертностью рачков в контроле:

$$d_{Cu} = 1890 \cdot C^{3,45} - 0,077 \quad (5)$$

$$d_{Zn} = 1,28 \cdot C^{1,13} - 0,082 \quad (6)$$

$$d_{Co} = 0,125 \cdot C^{0,571} - 0,075 \quad (7)$$

Основываясь на этих уравнениях, несложно определить летальные для гаммарусов концентрации ионов металлов за любое количество суток. В качестве примера приведем расчет  $LC_{50}$  ионов меди за четверо суток. В соответствии с уравнением (1) определим величину  $d_{Cu}$  при условии, что за 4 суток погибает 50% рачков. Тогда

$$d_{Cu} = \frac{\ln 100 - \ln 50}{4} = 0,1733 \text{ сут}^{-1}.$$

Приравняв правую часть уравнения (5) к  $0,1733 \text{ сут}^{-1}$ , определим концентрацию ионов меди, вызывающую 50%-ную гибель бокоплазов за первые четверо суток:

$$CL_{50} = \left( \frac{0,1733 + 0,077}{1890} \right)^{1/3,45} = 0,075 \text{ мг/л.}$$

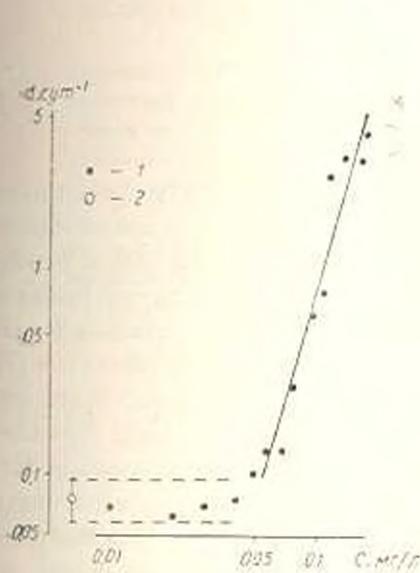


Рис. 1.

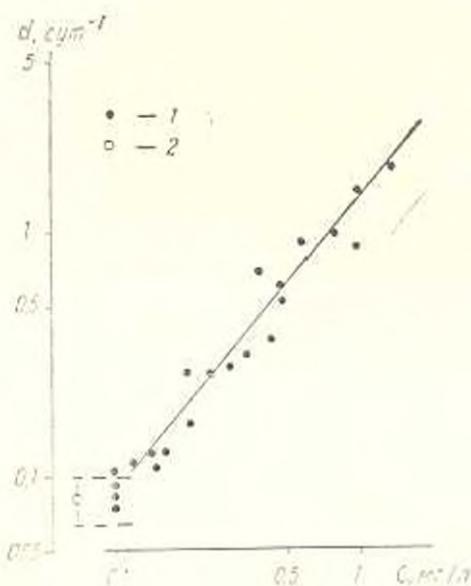


Рис. 2.

Рис. 1. Зависимость средней удельной смертности бокоплазов *G. lacustris* за время их жизни в эксперименте ( $d$ ,  $\text{сут}^{-1}$ ) от концентрации ионов меди ( $C$ ,  $\text{мг/л}$ ) 1 — опыт, 2 — контроль. Пунктирные линии — доверительные интервалы удельной смертности гаммарусов в контроле с надежностью 0,95  
Рис. 2. Зависимость средней удельной смертности бокоплазов *G. lacustris* за время их жизни в эксперименте от концентрации ионов цинка. Обозначения, как на рис. 1.

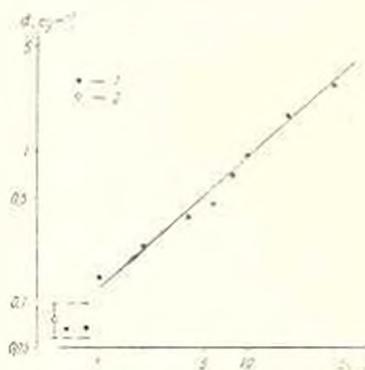


Рис. 3. Зависимость средней удельной смертности бокоплазов *G. lacustris* за время их жизни в эксперименте от концентрации ионов кобальта. Обозначения, как на рис. 1.

Для сравнения в таблице приведены концентрации ионов меди, цинка и кобальта, вызывающие 50%-ную гибель рачков *G. lacustris* ( $CL_{50}$ ) за 1, 4, и 10 суток.

Концентрации ионов меди, цинка и кобальта (мг/л), вызывающие 50%-ную гибель рачков *G. lacustris* за 1, 4 и 10 сут (рассчитаны по уравнениям (5)–(7))

Ионы металлов	Сутки		
	1	4	10
$Cu^{2+}$	0.105	0.075	0.164
$Zn^{2+}$	0.651	0.256	0.164
$Co^{2+}$	8.04	2.20	1.18

Как видно, концентрации ионов меди, цинка и кобальта, вызывающие 50%-ную гибель рачков за сутки, в 1,6; 4,0 и 6,8 раз соответственно выше, чем концентрации ионов этих металлов, вызывающие подобный эффект за 10 суток. Данные таблицы свидетельствуют также о снижении токсического действия ионов металлов на *G. lacustris* в следующем порядке:  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ . С помощью уравнений (5)–(7) можно рассчитывать  $CL_{100}$ , т. е. максимальную концентрацию ионов металлов, при которой удельная смертность гаммарусов в опыте статистически не отличается от таковой в контроле. Приравняв уравнения (5), (6) и (7) к нулю, для ионов меди получим  $CL_{100} = 0,053$  мг/л, ионов цинка  $CL_{100} = 0,98$  мг/л, для ионов кобальта  $CL_{100} = 0,556$  мг/л. Следовательно, максимальные концентрации ионов металлов, вызывающие такую же смертность гаммарусов, как и в контрольных условиях, убывают в следующем порядке:  $Co^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ . Это подтверждает сделанный выше вывод об относительно высокой токсичности ионов меди и относительно низкой — ионов кобальта.

Таким образом, зависимость удельной смертности рачков *G. lacustris* в эксперименте находится в степенной зависимости от концентрации ионов меди, цинка и кобальта. Полученные соотношения между удельной смертностью рачков, обусловленной исключительно токсическим действием ионов меди, цинка и кобальта, и концентрациями ионов этих металлов позволяют вычислять для исследованных ионов летальные концентрации в пределах от  $CL_{100}$  до  $CL_{<100}$  за разные интервалы времени. Приведенные результаты свидетельствуют о снижении токсического действия ионов металлов на рачков *G. lacustris* в следующем порядке:  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ .

Поступило 28.IV 1987 г.