

ВЛИЯНИЕ ДИМЕТИЛДИСУЛЬФИДА НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЕСТ-ОРГАНИЗМОВ РАЗЛИЧНОЙ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

Г. М. Чуйко^{1,*}, И. И. Томилина^{1,**}, Н. С. Шевченко¹,
О. А. Угарова¹, Е. И. Головкина¹, М. В. Медянкина²

¹Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук,
152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: *gchuiko@ibiw.ru, **i_tomilina@mail.ru

²Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского,
109004 Москва, ул. Земляной Вал, 73

Поступила в редакцию 11.11.2024

Получены новые данные о влиянии диметилдисульфидов (ДМДС) на гидробионтов различной систематической принадлежности. Определены пороговые концентрации ДМДС, установленные при хроническом действии ДМДС на прирост клеток водоросли *Chlorella vulgaris* — 0.05 мг/л, на репродуктивные показатели *Ceriodaphnia affinis* — 5.0 мг/л, возникновение патоморфологических и патоанатомических изменений у взрослых рыб *Danio rerio* — 5.0 мг/л. Изменение численности клеток зеленой водоросли *Chlorella vulgaris* — наиболее чувствительная тест-функция. Установленные токсикологические параметры могут быть использованы для определения класса опасности и корректировки нормативов содержания ДМДС в воде.

Ключевые слова: диметилдисульфид, водоросли, ветвистоусые рачки, рыбы, токсичность.

DOI: 10.47021/0320-3557-2025-58-70

ВВЕДЕНИЕ

Диметилдисульфид (ДМДС) представляет собой органическое химическое соединение с молекулярной формулой CH_3SSCH_3 . Это легко воспламеняющаяся жидкость с неприятным, чесночным запахом. Молекулярная масса 94.2, плотность 1.046 г/см³ при 20°C, температура кипения 118°C.

ДМДС широко распространен в природе, образуется в клетках различных представителей флоры и фауны в ходе метаболизма сераорганических соединений. Так, цветки растения *Aristolochia microstoma* Boissier & Spruner, 1844 выделяют летучие соединения, характерные для запаха разлагающихся насекомых. Предположительно этим запахом растение привлекает опылителей — мух-горбатов *Helicodiceros muscivorus* Engler, 1879 [Stensmyr et al., 2002]. Методом газовой хроматографии в сочетании с масс-спектрометрией были проанализированы летучие соединения цветков *Aristolochia microstoma*. Всего было обнаружено 16 веществ, но только три из них содержались в значительном количестве: диметилдисульфид (от 40 до 79%, в зависимости от участка исследования), 2,5-диметилпиразин (от 8 до 47%) и диметилтрисульфид (от 1 до 5%) [Rupp et al., 2021].

В пищевой промышленности ДМДС используют в качестве пищевой добавки в острых, суповых и фруктовых приправах для усиления запаха лука, чеснока, сыра и мяса. На нефтеперерабатывающих заводах — в качестве сульфидирующего агента. ДМДС является одним из основных компонентов метилсернистых соединений, загрязняющих воздух рабо-

чей зоны в процессе производства сульфатной целлюлозы [Бейм, 1984 (Bejm, 1984); Селюжицкий и др., 1989 (Selyuzhickij et al., 1989)].

В сельском хозяйстве ДМДС применяется как фумигант почвы, зарегистрированный в США и других странах под коммерческим названием “Паладин”¹. Препарат высокоэффективен в борьбе с почвенными болезнями и нематодами многих сельскохозяйственных культур, таких как томаты [Yu et al., 2019], огурцы [Mao et al., 2014], клубника [Chamorro et al., 2016] и другие культуры [Gómez-Tenorio et al., 2015, Conkle et al., 2016].

Отмечено, что ДМДС обладает умеренными токсичностью и раздражающим действием на слизистую глаз и слабовыраженной биоаккумуляцией [Обзор рынка..., 2012 (Obzor rynka..., 2012)].

Установлены гигиенические нормативы ДМДС: ПДК в воде — 0.04 мг/л, 3 класс опасности (лимитирующий показатель вредности — органолептический), ПДК в воде водоема, используемого для рыбохозяйственных целей, — 0.00001 мг/л, токсичен, 1 класс опасности (лимитирующий показатель вредности — санитарно-токсикологический) [Дюсенгалиев и др., 2016 (Dyusengaliev et al., 2016)]. Норматив, установленный по токсикологическому показателю, более жесткий, чем по органолептическому, хотя вещество обладает очень неприятным запахом даже в низких концентрациях. Ранее было отмечено, что порог ощущения запаха ДМДС уста-

¹ <https://www.arkema.com>

новлен на уровне 0.03 мг/л [Коптяев, 1967 (Кортуяев, 1967)]. Имеется лишь ограниченная информация о проявлении эффектов при воздействии ДМДС на тест-организмы различной систематической принадлежности, что не позволяет в полной мере судить о его биологической безопасности. Кроме того, за время, прошедшее с момента установления норматива, приборная база для определения

безопасных уровней ДМДС изменилась в лучшую сторону.

В силу вышеназванных причин актуальна цель исследования — детально изучить экотоксикологические свойства ДМДС, оценить его влияние и определить токсикологические параметры для гидробионтов различной систематической принадлежности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Токсичность ДМДС оценивали в соответствии со стандартными методиками биотестирования с использованием трех тест-организмов: одноклеточной зеленой водоросли *Chlorella vulgaris* Beijer, 1890 [Методика определения..., 2007 (Metodika opredeleniya..., 2007); Методы оценки..., 2014 (Metody ocenki..., 2014)], ветвистоусого рачка *Ceriodaphnia affinis* Lillijeborg, 1900 [Методика биотестирования..., 2007 (Metodika biotestirovaniya..., 2007); Mount, Norberg, 1984] и аквариумной рыбки данио рерио *Danio rerio* Hamilton, 1822 [Методы испытания..., 2016 (Metody ispytaniya..., 2016)]. В экспериментах использовали альгологически чистую культуру хлореллы из коллекции микроводорослей и лабораторные культуры цериодафний и дикой формы данио, имеющихся в Институте биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН.

Эксперименты на *Chlorella vulgaris*. Методика определения токсичности растворов с использованием хлореллы основана на регистрации изменения темпа роста (снижение или увеличение численности) клеток водорослей под воздействием токсических веществ, присутствующих в тестируемой воде (опыт), по сравнению с культурой в пробах, не содержащих токсических веществ (контроль).

В экспериментах по определению острого токсического действия устанавливали: 1) острую токсичность ДМДС по снижению численности клеток водорослей на 50% и более по сравнению с контролем за 72 ч экспозиции. Стимуляцию до уровня 30%, по сравнению с контролем, считали как нетоксичное действие исследуемых экспериментальных растворов на тест-организм; 2) безвредную (не вызывающую эффекта острой токсичности) концентрацию.

Для изучения хронического влияния ДМДС на хлореллу были проведены эксперименты продолжительностью 96 ч–14 сут.

При определении токсичности растворов ДМДС в стеклянные плоскодонные колбы вместимостью 250 мл наливали по 100 мл исследуемого раствора, в такие же колбы контрольной серии — дистиллированной воды

с рН 7.0–7.5. Затем в каждую колбу пипеткой добавляли по 0.1 мл испытуемого концентрированного раствора реактивов питательной среды Тамиа, используемой для культивирования водорослей. Затем во все колбы добавляли равные объемы суспензии водорослей с таким расчетом, чтобы численность клеток в них составила 25–35 тыс. кл./мл. Численность клеток в каждой колбе подсчитывали дважды. Колбы устанавливали в люминостат и инкубировали при температуре от +22°C до +25°C и постоянной освещенности 3000–10000 лк. Подсчет численности клеток в контрольных и опытных колбах проводили в камере Горяева. Повторность не менее чем двукратная [Методика определения..., 2007 (Metodika opredeleniya..., 2007)].

При определении токсического действия для каждого разведения по результатам двух параллельных определений вычисляли среднее значение численности клеток по формуле:

$$\bar{X} = \frac{\sum Xi}{n},$$

где \bar{X} — среднее значение тест-параметра (численности клеток); Xi — значения тест-параметра в i -том параллельном определении; n — количество параллельных определений.

Рассчитывали относительное (%) изменение численности клеток водорослей для каждой концентрации ДМДС по сравнению с контролем:

$$I = \frac{Xk - Xo}{Xk} \times 100\%,$$

где Xk — среднее значение тест-параметра в контроле, Xo — среднее значение тест-параметра в опыте.

Эксперименты на *Ceriodaphnia affinis*. Методика основана на определении смертности и плодовитости цериодафний при воздействии водных растворов, содержащих тестируемые вещества (опыт), по сравнению с контрольной культурой в пробах, не содержащих их (контроль), за 7 сут или за время вымета трех пометов [Mount, Norberg, 1984].

Определение токсичности каждой пробы проводили в десяти стаканах в трех повторно-

стях и сопровождали серией контроля. В стеклянные стаканы, вместимостью 15 мл, с 10 мл исследуемых экспериментальных растворов помещали по одной цериодафнии, не более 24-часового возраста (разница между возрастом рачков не должна составлять более 8 ч, что определяется по размеру рачков и обеспечивается синхронизированным культивированием).

При определении острой токсичности растворы ДМДС за время эксперимента не меняли. Учет смертности рачков в опыте и контроле проводили один раз в сутки ежедневно до истечения 48 ч. Неподвижных особей считали погибшими, если они не начинали двигаться в течение 15 секунд после легкого покачивания стакана. Рачков в острых опытах не кормили. Критерием *острой токсичности* служила гибель 50% и более рачков за 48 ч в исследуемых растворах при условии, что в контроле гибель рачков не наблюдали.

В экспериментах по определению хронического токсического действия цериодафний кормили перед началом эксперимента и в последующие дни один раз в сутки. Смену растворов ДМДС на новые осуществляли через каждые двое суток из исходных растворов, хранящихся в холодильнике при температуре от +2°C до +4°C. Учет смертности и родившейся молоди в опыте и контроле проводили ежедневно до конца хронического опыта. Молодь подсчитывали и удаляли. Хронический опыт считали законченным, если в контроле выжило 80% испытуемых рачков, а 60% и более из них дали три поколения молоди. Критерием *хронической токсичности* служила гибель 20% и более тест-организмов и достоверное отклонение в плодовитости из числа выживших по сравнению с контролем.

Эксперименты на рыбах *Danio rerio*. Маточное стадо дикой формы данио, самцы и самки совместно (60 экз.), содержали в 30-литровых аквариумах с отстоянной биологизированной артезианской водой с рН 7.2, температурой 28°C, общей минерализацией 123 мг/л, содержанием растворенного кислорода 7.8–8.1 мг/л, при фотопериоде день:ночь — 10:14 часов. Рыб кормили 3 раза в сутки сухим кормом для аквариумных рыб COPPENS ADVANCE (Германия) с использованием автоматических кормушек. Оплодотворенную икру в необходимом количестве получали непосредственно перед экспериментом от одной самки и 2–3 самцов. Сразу после нереста икру собирали в пластиковые стаканы со 100 мл культуральной воды, отделяли неоплодотворенную, остальную использовали

в экспериментах не позже, чем через час после нереста (стадия 4–8 зародышевых клеток).

Эксперименты по установлению острого токсического действия ДМДС для икры проводили в чашках Петри, прикрытых крышками для уменьшения испарения воды и стабильного поддержания заданных концентраций, с 40 мл культуральной воды (контроль) или содержащей растворы с различной концентрацией ДМДС (опыт). В каждую чашку Петри помещали по 30 икринок, каждый вариант эксперимента проводился в двух повторностях. Температура экспериментальных растворов 23–25°C, остальные параметры как при культивировании рыб. Продолжительность развития эмбрионов до вылупления 72–96 ч, развитие предличинок до перехода на внешнее питание — 6–8 сут после оплодотворения икры. В ходе эксперимента у эмбрионов и предличинок регистрировали следующие показатели: количество погибших и живых особей, число уродств и время до выклева. Погибшую икру и личинок удаляли по мере их гибели. Эксперименты проводили в статических условиях, растворы ДМДС меняли каждые 48 ч.

Эксперименты по установлению острого токсического действия ДМДС для взрослых рыб проводили в двух-трех повторностях в пластиковых емкостях с 1 л культуральной воды на рыбах возрастом 4–6 мес обоих полов длиной 15–26 мм и массой 26.3–138.8 мг. Физико-химические характеристики воды были такие же, как при культивировании рыб и экспериментах на эмбрионах и предличинках. Эксперименты проводили в статических условиях, растворы ДМДС меняли каждые 48 ч. Продолжительность экспозиции в растворах ДМДС — 96 ч. Рыб в течение эксперимента не кормили. Регистрировали живых и погибших рыб, а также внешние симптомы отравления (двигательная активность, потемнение покровов, искривление позвоночника, пространственное распределение по объему аквариума, реакция на звуковой раздражитель). После окончания эксперимента у рыб измеряли длину тела до конца чешуйного покрова и взвешивали массу тела. Отдельных рыб (3–4 экз.) вскрывали для патологоанатомического обследования.

Для определения острой токсичности исследуемого вещества рассчитывали процент погибших в тестируемом растворе особей (A , %) по сравнению с контролем по формуле:

$$A = \frac{Xk - Xt}{Xk} \times 100\%,$$

где Xk — количество выживших особей в контроле, Xt — количество выживших особей в эксперименте.

Для оценки влияния ДМДС на взрослых рыб в условиях хронического эксперимента при экспозиции 30 сут проведено две серии опытов. В первой тестировались концентрации исследуемого вещества 0.01 мг/л и 0.1 мг/л, во второй — 1 и 5 мг/л. Контролем служили рыбы тех же размерно-массовых характеристик, которые содержались в воде без добавления вещества в одинаковых с опытными условиях.

Все варианты опыта ставили в двух повторностях, рыб кормили ежедневно с утра сухим кормом *Cornpens advance* (Alltech Cornpens GmbH Delle Weg, Германия). Во время смены воды кормление проводили не менее чем за 2 ч до смены воды.

В ходе экспериментов регистрировали выживаемость, нарушения покровов тела, изменения морфофизиологических параметров, поведение и клиническую картину отравления рыб, патологоанатомические показатели.

Расчет значений ЛК₅₀, ЭК₅₀, ПК и МДК. Расчет значений ЛК₅₀ (летальная концентрация, вызывающая 50% гибель тест-организмов) в острых и ЭК₅₀ (эффективная концентрация, которая вызывает ответ у половины (50%) организмов за определенный срок экспозиции) и МДК (максимально допустимая концентрация) в хронических опытах для всех тест-организмов проводили графическим методом пробит-анализа [Probit Analysis, 1952].

Для расчета токсикометрических параметров изначально строили линии регрессии по методу наименьших квадратов с использование данных эксперимента. При этом используется линейная зависимость, представленная в форме:

$$y = a + b \lg C,$$

где y — пробит (пробит определяется по таблице, в которой каждому проценту смертности или регистрируемому нелетальному эффекту соответствует определенное число

— пробит), а $\lg C$ — десятичный логарифм от концентрации.

Значению ЛК₅₀ и ЭК₅₀ соответствует $y=5$, а для МДК $y=2.67$ (минимальное возможное значение пробита при регистрируемом токсическом эффекте 1%). Подставляя соответствующие значения в уравнение, находили значения x , равные $\lg C$. Преобразуя значения $\lg C$ в антилогарифм, находили значения соответствующих концентраций (мг/л). Пороговой считали минимальную использованную при тестировании концентрацию (ПК), превышающую МДК и вызывающую минимальный токсический эффект.

Приготовление растворов ДМДС. Маточный раствор ДМДС готовили объемным методом, исходя из известной плотности вещества 1.06 г/см³, что в перерасчете на объем составляет 0.943 мл/л, или 1 г/л. Для этого отмеряли расчетный объем. Различные концентрации ДМДС готовили из маточного раствора методом последовательного объемного ступенчатого разведения каждого последующего раствора из предыдущего.

Для приготовления маточных растворов ДМДС использовали культуральную холодную воду (8°C) с целью предотвращения потерь за счет испарения вещества, а для последующих концентраций — воду с комнатной температурой (24–25°C). Приготовление растворов проводили в закрытой лабораторной посуде при интенсивном и постоянном перемешивании на магнитной мешалке.

Статистическая обработка результатов. Данные представляли в виде средних значений и их ошибок ($\bar{x} \pm SE$). Различия между группами проверяли на нормальность распределения, сравнивали в пакете программ Statistica и Excel при уровне значимости $p=0.05$. Результаты обрабатывали статистически, используя метод однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) и процедуру LSD-теста при уровне значимости $p=0.05$ [Sokal, Rohlf, 1995].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Токсичность ДМДС для зеленой водоросли *Chlorella vulgaris*. Результаты предварительного острого эксперимента свидетельствуют, что концентрация ДМДС 10 г/л вызывала подавление роста клеток зеленой водоросли хлорелла на 100% за 24 ч экспозиции. Снижение концентрации до 5 г/л подавляло рост клеток на 95.81% относительно контроля, 500 мг/л — 90.18%. Концентрация 100 мг/л оказалась нетоксичной, процентное отклонение от контроля составило 9.5% (табл. 1). При увеличении времени экспозиции до 72 ч при концентрации ДМДС 5 г/л рост клеток

прекращался, отклонение от контроля составило 96.76% (табл. 1). Снижение концентрации до 500 мг/л подавляло рост клеток на 92.76% относительно контроля. Концентрацию 100 мг/л при экспозиции 72 ч можно считать среднетоксичной, процентное отклонение от контроля составило 39.04% (табл. 1).

Для определения концентрации ДМДС, вызывающей 50% подавление роста клеток хлореллы и недействующей концентрации за 72 ч экспозиции был поставлен эксперимент с рядом более низких концентраций: 500, 100, 50, 10, 5 и 1 мг/л (табл. 2). По результатам

данного эксперимента концентрации ДМДС 50, 100 и 500 мг/л относятся к высокотоксичным, т.к. подавление роста клеток водорослей за время экспозиции составило 60.9, 74.4 и 84.1% контроля соответственно. Концентрацию 10 мг/л следует отнести к среднетоксич-

ным, процентное отклонение роста клеток водорослей от контроля было значимым и составило 42.5%. Концентрации 5 и 1 мг/л считали нетоксичными, отклонение от контроля составило 26.48 и 12.18% соответственно.

Таблица 1. Острая токсичность ДМДС в диапазоне концентраций 100 мг/л–10 г/л на прирост численности клеток водорослей *Ch. vulgaris*

Table 1. Acute toxicity of DMDS in the concentration range of 100 mg/L–10 g/L on the increase in the number of algae cells of *Ch. vulgaris*

Концентрация, мг/л Concentration, mg/L	Экспозиция, ч Exposure, hours	Численность клеток водорослей, тыс. кл./мл The number of algae cells, thousand cells/ml			Среднее значение Average	Отклонение от контроля, % Deviation, %
		Повторность / Replication				
		1	2	3		
Контроль / Control 10000 5000 500 100	24	100	101	101	100.67±0.19	–
		0	0	0	0*	–100
		3.67	5	4	4.22±0.69*	–95.8
		10.67	10	9	9.89±0.28*	–90.2
Контроль / Control 5000 500 100	72	151.67	152	142	148.56±1.89	–
		5.67	4	4.67	4.78±0.28*	–96.76
		9.33	11.66	11.67	10.89±0.45*	–92.67
		85.33	98.67	87.67	90.56±2.37*	–39.04

Примечание. Здесь и далее “*” — статистически значимое отклонение от контроля при $p = 0.05$.

Note. Here and further “*” is a statistical significant deviation from the control at $p = 0.05$.

Таблица 2. Острая токсичность ДМДС в диапазоне концентраций 1–500 мг/л на прирост численности клеток водорослей *Ch. vulgaris*

Table 2. Acute toxicity of DMDS in the concentration range of 1–500 mg/L on the increase in the number of algae cells of *Ch. vulgaris*

Концентрация, мг/л Concentration, mg/L	Экспозиция, ч Exposure, hours	Численность клеток водорослей, тыс. кл./мл The number of algae cells, thousand cells/ml			Среднее значение Average	Отклонение от контроля, % Deviation, %
		Повторность / Replication				
		1	2	3		
Контроль / Control 500 100 50 10 5 1	72	99.67	112.33	116.67	109.56±2.94	–
		20.33	17.66	14.33	17.44±1.0*	–84.08
		26	28.34	29.66	28±0.62*	–74.44
		42	41	45.66	42.88±0.82*	–60.86
		58.34	65.33	65.33	63±1.35*	–42.5
		84.66	76.33	80.66	80.55±1.39*	–26.48
		93.33	96	99.33	96.22±1.0	–12.18

Рассчитанное значение ЛК₅₀ по подавлению прироста численности клеток водорослей на 50% при действии ДМДС при экспозиции 72 ч составляет ЛК₅₀=23.28 мг/л. Соответственно значение МДК вещества — 0.037 мг/л. ПК при этом равнялась 0.05 мг/л.

Для выявления хронического действия низких концентраций ДМДС на прирост клеток хлореллы был проведен эксперимент продолжительностью 14 сут и концентрациями вещества в диапазоне 0.05–5 мг/л (табл. 3). Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют, что при экспозиции 24 ч раствор ДМДС в концентрациях 0.1 и 0.5 мг/л оказыва-

ет слаботоксическое действие на прирост численности клеток в соответствии с критериями оценки токсичности веществ по этому показателю водорослей в анализируемой пробе относительно контроля. При этом степень подавления роста была незначительной. Увеличение экспозиции до 72 ч приводило к подавлению прироста клеток на 28–31% в концентрациях вещества 0.5–5 мг/л. Дальнейшее увеличение экспозиции до 7 сут не влияло на прирост клеток в концентрациях 0.5, 1 и 5 мг/л, а концентрации 0.05 и 0.1 оказывали слаботоксическое действие на прирост клеток, подавляя его на 13.09 и 11.52% соответственно.

Таблица 3. Хроническая токсичность ДМДС на прирост численности клеток водорослей *Ch. vulgaris***Table 3.** Chronic toxicity of DMDS on the increase in the number of algae cells of *Ch. vulgaris*

Концентрация, мг/л	Экспозиция, ч Exposure, hours	Численность клеток водорослей, тыс. кл./мл The number of algae cells, thousand cells/ml		Среднее значение Average	Отклонение от контроля, % Deviation, %
		Повторность / Replication			
		1	2		
Контроль / Control	24	37	34	35.5±1.06	–
5		41	28	34.5±4.59	–2.82
1		32	32	32±0	–9.86
0.5		30	31	30.5±0.35	–14.08
0.1		35	27	31±2.83	–12.68
0.05		33	41	37±2.8	+4.23
Контроль / Control	72	65	67	66±1.21	–
5		50	41	45.5±3.18*	–31.06
1		47	47	47±0.1*	–28.79
0.5		52	43	47.5±3.2*	–28.03
0.1		72	66	69±2.13	+4.54
0.05		64	69	66.5±1.77	+0.76
Контроль / Control	168 (7 сут)	100	91	95.5±3.2	–
5		66	68	67±1.21*	–29.84
1		74	68	71±2.12*	–25.65
0.5		71	79	75±2.83*	–21.47
0.1		86	83	84.5±1.1	–11.52
0.05		76	90	83±4.94	–13.09
Контроль / Control	336 (14 сут)	104	122	113±6.36	–
5		55	55	55±0*	–51.3
1		54	62	58±2.83*	–48.67
0.5		57	64	60.5±2.47*	–46.46
0.1		74	78	76±1.41*	–32.74
0.05		97	78	87.5±6.72	–22.57

При экспозиции 14 сут подавление прироста клеток во всех исследуемых концентрациях превышало 20% (табл. 3) и было значимым, за исключением концентрации 0.05 мг/л. Концентрация вещества 5 мг/л за период экспозиции оказывала высокотоксическое действие, подавляя рост клеток на 51.33%.

Учитывая все результаты хронического эксперимента по изменению численности клеток водорослей при действии различных концентраций ДМДС при экспозиции 14 сут, можно заключить, что при длительном воздействии концентрация вещества ниже 0.01 мг/л и ниже не будет оказывать токсического действия на хлореллу.

Токсичность ДМДС для ветвистоусого рачка *Ceriodaphnia affinis*. Зарегистрирована острая токсичность ДМДС для цериодафний в концентрации 100, 80 и 75 мг/л, т.е. гибель рачков за 48 ч экспозиции составила 100, 60 и 70% соответственно (табл. 4). При концентрации вещества 7.5 мг/л и ниже гибели рачков не наблюдали. Таким образом, рассчитанная концентрация, вызывающая гибель 50% цериодафний за 48 ч экспозиции, составляет ЛК₅₀=52.48 мг/л.

Таблица 4. Острая токсичность ДМДС для цериодафний при экспозиции 48 ч**Table 4.** Acute toxicity of dimethyl disulfide to ceriodaphnia at 48-hour exposure

Концентрация ДМДС, мг/л Dimethyl disulfide concentration, mg/L	Гибель, %, 48 ч Mortality, %, 48 hours
100	100
80	60
75	70
50	40
25	26.67
10	3.33
7.5	0
5	0
2.5	0
1	0
Контроль / Control	0

При увеличении времени экспозиции до 10 сут (хронические эксперименты) отмечена гибель рачков выше допустимого методикой 20% уровня в концентрациях ДМДС 10, 25, 50 и 75 мг/л (табл. 5). В концентрации 75 мг/л гибель составляла 100%. Гибели рачков в диапазоне концентраций 0.05–5 мг/л как за 48 ч, так и за 10 сут экспозиции не наблюдали.

В концентрациях 7.5–75 мг/л зарегистрировано угнетение репродуктивных показателей. Число пометов на 1 самку не достигало средних значений, снижение среднего количества молоди на 1 самку составляло 44.1–99.5% по сравнению с контролем и было статистически значимым. В диапазоне концентраций 0.5–5 мг/л снижение плодовитости было <20% и статистически не значимо. В более низких концентрациях 0.1 и 0.05 мг/л отмечено не до-

стоверное увеличение плодовитости рачков на 7.5 и 10% соответственно (табл. 4).

Таким образом, рассчитанная методом пробит-анализа концентрация ДМДС, вызывающая снижение среднего количества молоди на одну самку цериодафний на 50% (эффективная концентрация) за 10 сут. экспозиции, составляет ЭК₅₀=1.83 мг/л, значение МДК вещества — 1.01 мг/л. ПК ДМДС для цериодафний — 5 мг/л.

Таблица 5. Хроническая токсичность ДМДС для цериодафний при экспозиции 10 сут

Table 5. Chronic toxicity of dimethyl disulfide for ceriodaphnia at 10-day exposure

Концентрация, мг/л Concentration, mg/L	Гибель, %, 10 сут Mortality, %, 10 days	Среднее число пометов на 1 самку Average number of broods per 1 female	Среднее кол-во молоди на 1 самку Average number of juveniles per 1 female	Токсичность пробы Toxicity of the sample
75	100	0.08	0.1±0*	ХТД
50	66.7	1.43	2.6±0.88*	ХТД
25	36.7	2.07	7.3±1.4*	ХТД
10	23.3	1.97	10.4±0.7*	ХТД
7.5	3.3	2.53	15.6±0.5*	ХТД
5	0	2.86	15.37±0.86	НТ
2.5	0	2.93	18.1±0.77	НТ
1	0	2.93	17.53±0.85	НТ
0.5	0	3	19.03±0.82	НТ
0.1	0	3	20.53±0.63	НТ
0.05	0	3	20.0±0.72	НТ
Контроль / Control	0	3.2	18.6±0.81	–

Примечание. ХТД — хроническое токсическое действие, НТ — токсичность отсутствует, “*” — снижение плодовитости статистически значимо по сравнению с контролем (ANOVA, LSD-test, $p \leq 0.05$).

Note. ХТД — a chronic toxic effect, НТ — toxicity is absent, “*” — the decrease in fertility is statistically significant compared to the control (ANOVA, LSD-test, $p \leq 0.05$).

Острая токсичность ДМДС для рыб *Danio rerio*. Для взрослых рыб зарегистрирована абсолютная острая токсичность (гибель 100%) ДМДС в концентрации 50 мг/л и выше. В ряду концентраций 20–45 мг/л гибель рыб за 96 ч экспозиции составила 10–80% соответственно (табл. 6). При концентрациях 10 и 15 мг/л гибели рыб не наблюдали. Графическим методом пробит-анализа установлено, что концентрация, вызывающая 50% гибель взрослых рыб данио за 96 ч экспозиции, составляет ЛК₅₀=31.27, МДК=12.94, а ПК=20 мг/л.

Для икры рыб при экспозиции 96 ч зарегистрирована абсолютная (гибель 100%) острая токсичность ДМДС в концентрации 40 мг/л и выше (табл. 7). В ряду концентраций 25–35 мг/л гибель икры за 96 ч экспозиции составила 14.2–82.8% соответственно (табл. 7). При концентрации 20 мг/л и ниже гибели икры не наблюдали (0%).

Установлено, что концентрация ДМДС, вызывающая гибель 50% икры рыб данио за 96 ч экспозиции, составляет

ЛК₅₀=29.38 мг/л. Соответственно значение МДК вещества по показателю выживаемость составляет 20.57 мг/л, ПК — 25 мг/л.

Таблица 6. Острая токсичность ДМДС для рыб данио при экспозиции 96 ч.

Table 6. Acute toxicity of dimethyl disulfide for danio adult fish at 96 h exposure

Концентрация, мг/л Concentration, mg/L	Гибель, % Mortality, %
Контроль / Control	0
10	0
15	0
20	10
25	27.7
30	50.0
35	66.6
40	73.3
45	80
50	100
55	100
60	100

Таблица 7. Острая токсичность ДМДС для икры рыб при экспозиции 96 ч**Table 7.** Acute toxicity of dimethyl disulfide for fish roe at 96 h exposure

Концентрация, мг/л Concentration, mg/L	Гибель, % Mortality, %
Контроль / Control	0
10	0
20	0
25	14.2
28	31.9
30	50.4
32	71.0
35	82.8
40	100.0
50	100.0

Таблица 8. Острая токсичность ДМДС для предличинок рыб при экспозиции 192 ч.**Table 8.** Acute toxicity of dimethyl disulfide for fish larvae at exposure of 192 h.

Концентрация, мг/л Concentration, mg/L	Смертность, % Mortality, %
Контроль / Control	0
10	0
20	0
25	5.8
28	19.0
30	40.4
32	96.7
35	95.6
40	100.0
50	100.0

Таблица 9. Гибель *D. rerio* в хроническом эксперименте (экспозиция 30 сут)**Table 9.** Mortality of *D. rerio* in a chronic experiment (exposure 30 days)

Концентрация, мг/л Concentration, mg/L	Количество рыб (экз.) Number of fish (ind.)	Гибель, % Mortality, %
0 (контроль 1)	20	0
0.01	20	0
0.1	20	0
0 (контроль 2)	20	0
1	20	0
5	20	10

После выклева предличинок экспонировали в растворах вещества еще 96 ч до перехода на экзогенное питание. Для предличинок при общей экспозиции 192 ч зарегистрирована абсолютная острая токсичность (гибель 100%) ДМДС в концентрации 40 мг/л и выше. В ряду концентраций 25–35 мг гибель предличинок за 192 ч экспозиции составила 5.8–95.6% соответственно (табл. 8). При концентрациях 10 и 20 мг/л гибели икры не наблюдали (0%).

Концентрация ДМДС, вызывающая гибель 50% предличинок рыб данио за 192 ч экспозиции, составляет ЛК₅₀=28.9 мг/л. Соответственно значение МДК вещества по показателю выживаемость составляет 21.3 мг/л, ПК — 25 мг/л.

Хроническая токсичность ДМДС для рыб *D. rerio*. Действие ДМДС изучали в хронических опытах продолжительностью 30 сут.

Патоморфологические и патологоанатомические изменения. Внешний осмотр рыб не выявил отличий от контроля при концентрациях действующего вещества 0.01, 0.1 и 1 мг/л. Покровы тела гладкие, чешуя не взъерошена, узор на теле хорошо выражен, жабры розовые. При концентрации 1 мг/л у 2 рыб из 20 окраска была более светлой, а рисунок на теле слабо выраженным. В 5 мг/л, напротив, у 50% рыб окраска тела оказалась более темной по отношению к контрольным. У 1 особи отмечено искривление хвостового стебля в дистальной части (см. рисунок).

**Рисунок.** Искривление хвостового стебля рыбы в дистальной части после экспозиции 30 сут в растворе ДМДС с концентрацией 5 мг/л.

Figure. Curvature of the caudal stem of the fish in the distal part after exposure for 30 days in a dimethyl disulfide solution with a concentration of 5 mg/L.

Результаты осмотра внутренних органов показали, что селезенка ярко-красная, у 5% рыб (1 из 20) при концентрациях вещества 0.01 и 0.1 мг/л отмечена более крупная селезенка, у 2 особей при концентрации 1 мг/л она была темно-красной, у 1 особи в 5 мг/л маленькой и у 1 — более крупной, чем у контрольных особей. Печень у всех рыб была светло розовой, у 2 особей при 5 мг/л — более светлой. Желчный пузырь у всех рыб был некрупным, с прозрачным светло-желтым содержимым, кишечник наполнен пищевой массой.

Выживаемость при экспозиции рыб в течение 30 сут в растворах ДМДС не отличалась от контроля. Максимальная гибель 10% зарегистрирована при концентрации 5 мг/л (табл. 9).

Таким образом, по патоморфологическим и патоанатомическим критериям и гибели при хроническом действии ДМДС на рыб пороговой является концентрация вещества 5.0 мг/л, МДК составляет 1.0 мг/л.

Рассчитанные значения LK_{50} сложно сравнивать между собой, поскольку продолжительность острых экспериментов была неодинаковой: от 48 до 96 часов. В данном случае более показательна МДК вещества. Тест-организмы, использованные в работе,

ОБСУЖДЕНИЕ

Работ, посвященных токсичности ДМДС на гидробионтов различной систематической принадлежности, немного. Поэтому трудно сравнивать результаты различных исследований, поскольку некоторые из них были разработаны для наблюдения за воздействием определенных концентраций, в других сообщается только о летальных или средних летальных концентрациях, а продолжительность воздействия могла быть неодинаковой для каждой концентрации [Селюжинский, 1972 (Celyuzhinskij, 1972); Мещачкова, Бенеманский, 2005 (Meshchakova, Benemanskij, 2005); Ljunggren, Norberg, 2008].

Установлено, что при добавлении ДМДС в среду происходили изменения в микробном сообществе. Обнаружено, что *Thioalkalibacter halophilus* обладает высокой устойчивостью к повышенным концентрациям ДМДС (2.37 ± 0.10 ммоль/л). Кроме того, наблюдалось сокращение численности доминирующего вида *Th. sulphidifilus* и был обнаружен *Alkalilimnicola ehrlichii* [Kiragosyan et al., 2020]. Грамположительный факультативный анаэроб в форме палочки, идентифицированный как *Bacillus cereus* GIGAN 2 может эффективно удалять ДМДС в водном растворе в аэробных условиях. При этом начальная концентрация, значение pH и температура играют важную роль в биодegradации ДМДС, в растворе с концентрацией 10 мг/л при оптимальных условиях (30°C, pH 7.0) может быть удалено до 100% вещества в течение 96 ч [Liang et al., 2015].

Мутагенная активность ДМДС оценена с помощью бактериологического анализа обратной мутации, проведенного в соответствии с OECD TG 471 с использованием стандартного метода внесения в планшеты. Штаммы *Salmonella typhimurium* TA98, TA100, TA1535 и TA1537, а также штамм *Escherichia coli* WP2uvrA обрабатывали ДМДС в диметилсульфоксиде в концентрациях <5000 мкг/таблетку. Ни в одной из тестируемых концентраций не наблюдалось увеличения среднего количества ревертантных колоний т.е. в условиях ис-

располагались в следующем порядке по возрасту МДК: *Chlorella vulgaris* → *Ceriodaphnia affinis* → взрослые *Danio rerio* → икра *D. rerio* → предличинки *D. rerio*. Изменение численности клеток зеленой водоросли *Chlorella vulgaris* — наиболее чувствительная тест-функция, затем в равной степени — плодовитость ветвистоусого рачка *Ceriodaphnia affinis* и патоморфологические и патоанатомические изменения у рыб *Danio rerio*.

следования ДМДС не обладал мутагенностью в тесте Эймса [ЕСНА, 2010].

В ходе микроядерного теста *in vivo*, проведенного в соответствии с требованиями OECD TG 474 была оценена кластогенная активность ДМДС. Исследуемый материал вводили в виде аэрозоля путем ингаляции группам самцов и самок крыс. Вводили дозы 175, 350 и 700 мг/кг. Мышей после каждого уровня дозы усыпляли через 72 ч, извлекали костный мозг и исследовали его на наличие полихроматических эритроцитов. Исследуемый материал не вызывал статистически значимого увеличения количества полихроматических эритроцитов с микроядрами в костном мозге [ЕСНА, 2012]. ДМДС был признан не кластогенным в микроядерном тесте *in vivo*. Исходя из имеющихся данных, ДМДС не вызывает опасений в отношении генотоксического потенциала.

В паспорте безопасности вещества показаны его летальные концентрации для водорослей, беспозвоночных и рыб. При экспозиции 96 ч LK_{50} для *Danio rerio* составляет 5.01, *Cyprinodon variegatus* — 5.6, *Salmo salar* — 1.75 мг/л. При экспозиции 48 ч $ЭК_{50}$ для *Daphnia magna* — 7 мг/л. Концентрации, при которых не наблюдается токсичный эффект для рыб <2.7 мг/л, водорослей (вид конкретно не указан) — 6.7 мг/л, диатомовой водоросли *Skeletonema costatum* — 3.9 мг/л, ветвистоусого рачка *D. magna* — 1.82 мг/л, мизиды *Mysidopsis bahia* — 5 мг/л. Отмечено, что ДМДС не является легко биоразлагаемым веществом и может быть токсичен для водных организмов с долгосрочными последствиями [Паспорт безопасности..., 2010 (Pasport bezopasnosti..., 2010)].

Полученные нами результаты по острой токсичности ДМДС отличаются от представленных в паспорте безопасности вещества. Возможно, это связано с низкой устойчивостью вещества к действию физико-химических факторов и высокой скоростью его разложения в окружающей среде. В работе Танга с соавторами показано, что 92% разложения ДМДС

в почве происходит в течение первого часа после применения фумиганта [Tang et al., 2023]. Установлено, что в течение трех суток происходит снижение содержания ДМДС в воде на 53.5% [Отчет о научно-исследовательской..., 2023 (Otchet o nauchno-issledovatel'skoj..., 2023)].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлены диапазоны концентраций ДМДС от недействующей до вызывающей гибель 100%: для клеток хлореллы за время экспозиции 72 ч и цериодафний — за 48 ч экспозиции, для рыб — за 96 ч, составляющие 1–500, 10–100 и 10–80 мг/л соответственно. Рассчитаны значения ЛК₅₀ — концентрации, подавляющие на 50% прирост клеток хлореллы за 72 ч, вызывающая гибель 50% цериодафний за 48 ч экспозиции, икры, предличинок и взрослых рыб за 96 ч экспозиции, равные 23.28, 52.48, 29.38, 28.92 и 31.27 мг/л соответственно.

Таким образом, получены новые данные о влиянии ДМДС на гидробионты различной систематической принадлежности, выполненные в один и тот же период времени в одной лаборатории: водоросли, ветвистоусые рачки, разные стадии онтогенеза рыб.

При хроническом действии ДМДС на прирост клеток водоросли *Chlorella vulgaris* пороговой является концентрация вещества 0.05 мг/л, среднее число молодежи на 1 самку *Ceriodaphnia affinis* — 5.0 мг/л, возникновение патоморфологических и патоанатомических изменений у взрослых рыб *Danio rerio* — 5.0 мг/л.

Установленные токсикологические параметры могут быть использованы для определения класса опасности и корректировки нормативов содержания ДМДС в воде.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по темам “Роль абиотических и биотических факторов в формировании физиолого-биохимических и иммунологических показателей гидробионтов” (№124032500015-7) и “Физиолого-биохимические и иммунологические реакции гидробионтов под действием биотических и абиотических факторов окружающей среды” (№121050500046-8), а также при частичной финансовой поддержке в ходе выполнения НИОКР по теме “Разработка научно-обоснованного норматива предельно-допустимой концентрации на диметилдисульфид для водоемов рыбохозяйственного значения (исследования на фитопланктоне, зоопланктоне и рыбах)” по договору с ООО “ЭкоСервис-А” (г. Москва) от 22.03.2023 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бейм А.М. Эколого-токсикологические критерии регламентации метилсернистых соединений в сточных водах сульфат-целлюлозного производства. М.: ВНИПИЭИлеспрот. 1984. Вып. 8. 34 с.
- Дюсенгалиев К.И., Сагинаева А.Т., Кулбатыров Д.К. и др. Физико-химические характеристики субститутов дисульфидного масла углеводородного сырья // Нефтегазовое дело. 2016. № 5. С. 125–139. DOI: 10.17122/ogbus-2016-5-125-139.
- Коптяев В.Г. Экспериментальные данные по обоснованию предельно допустимой концентрации диметилсульфида в водоемах // Гигиена и санитария. 1967. Т. 32(3). С. 3–7.
- Методика биотестирования токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по смертности и изменению плодовитости цериодафний. Федеральные реестр (ФР). ФР 1.39.2007.03221. М.: АКВАРОС. 2007. 56 с.
- Методика определения токсичности вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей. Федеральный реестр (ФР) ФР.1.39.2007.03223. М.: АКВАРОС. 2007. 47 с.
- Методы испытания химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Острая токсичность для эмбрионов рыбы. (OECD, Test No. 236:2013, MOD). М.: “Стандартинформ”. 2016. 30 с.
- Методы оценки токсического влияния фитоценозов планктона на формирование качества поверхностных вод суши. Ростов на Дону: Росгидромет, 2014. 43 с.
- Мещакова Н.М., Бенеманский В.В. Оценка биологического действия диметилдисульфида с учетом специфических отдаленных эффектов // Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук. 2005. № 2(40). С. 209–212.
- Обзор рынка дисульфидного масла в России: аналит. обзор, август 2012 г. Исследовательская группа “Инфомайн”. М.: Инфомайн, 2012, 107 с.
- Отчет о научно-исследовательской работе по теме: “Разработка научно-обоснованного норматива предельно-допустимой концентрации (ПДК) на диметилдисульфида для водоемов рыбохозяйственного значения”. Бюрок. 2023. 71 с.
- Паспорт безопасности диметилдисульфида (№ 004111-001 (версия 4.0). ARKEMA France, 2010. 9 с.

- Селюжицкий Г.В. Экспериментальные данные к обоснованию ПДК метилмеркаптана, диметилсульфида и диметилдисульфида в воздухе рабочей зоны целлюлозно-бумажных предприятий // Гигиена труда. 1972. № 6. С. 46–47.
- Селюжицкий Г.В., Гарбуз А.М., Кандыбор Н.П. и др. Гигиена труда в целлюлозно-бумажной промышленности. М.: Лесная промышленность, 1989. 216 с.
- Chamorro M., Seijo T.E., Noling J.C. et al. Efficacy of fumigant treatments and inoculum placement on control of *Macrophomina phaseolina* in strawberry beds // *Crop Prot.* 2016. Vol. 90. P. 163–169. DOI: 0.1016/j.cropro.2016.08.020.
- Conkle J.L., Cabrera J.A., Thomas J.E. et al. Effects of CO₂ dissolution on phase distribution and degradation of dimethyl disulfide in soils under grape production // *Pest. Manage Sci.* 2016. Vol. 72(2). P. 349–353. DOI: 0.1002/ps.4004.
- ECHA, 2010. Dimethyl Disulfide Registration Dossier. (<https://echa.europa.eu/registration-dossier/-/registered-dossier/13671>).
- ECHA, 2012. Guidance on Information Requirements and Chemical Safety Assessment, November 2012. Vol. 2.1. <http://echa.europa.eu/>.
- Gómez-Tenorio M.A., Zanón M.J., de Cara M. et al. Efficacy of dimethyl disulfide (DMDS) against *Meloidogyne* sp. and three formae speciales of *Fusarium oxysporum* under controlled conditions // *Crop Prot.* 2015. Vol. 78. P. 263–269. DOI: 10.1016/j.cropro.2015.09.013.
- Kiragosyan K., Picard M., Sorokin D. et al. Effect of dimethyl disulfide on the sulfur formation and microbial community composition during the biological H₂S removal from sourgas streams // *J. Hazard. Mater.* 2020. Vol. 386. P. 121916. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121916.
- Liang Z., An T., Li G., Zhang Z. Aerobic biodegradation of odorous dimethyl disulfide in aqueous medium by isolated *Bacillus cereus* GIGAN2 and identification of transformation intermediates // *Bioresour. Technol.* 2015. Vol. 175. P. 563–568. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.11.002.
- Ljunggren G., Norberg B. On the Effect and Toxicity of Dimethyl Sulfide, Dimethyl Disulfide and Methyl Mercaptan // *Acta Physiol.* 2008. № 5(2–3). P. 248–255. DOI: 10.1111/j.1748-1716.1943.tb02053.x.
- Mao L., Yan D., Wang Q. et al. Evaluation of the combination of dimethyl disulfide and dazomet as an efficient methyl bromide alternative for cucumber production in China // *J. Agric. Food Chem.* 2014. Vol. 62(21). P. 4864–4869. DOI: 10.1021/jf501255w.
- Mount D.I., Norberg T.J. A seven-day life-cycle cladoceran toxicity test // *Environ. Toxicol. Chem.* 1984. Vol. 3. P. 425–434.
- Probit Analysis: A Statistical Treatment of the Sigmoid Response Curve (ed. D. J. Finney). NY-London: Cambridge Univ. Press, 1952. 318 p.
- Rupp T., Oelschlagel B., Rabitsch R. et al. Flowers of Deceptive *Aristolochia microstoma* Are Pollinated by Phorid Flies and Emit Volatiles Known From Invertebrate Carrion // *Front. Ecol. Evol., Sec. Chemical Ecology.* 2021. Vol. 9. Article 658441. DOI: 10.3389/fevo.2021.658441.
- Sokal R.R., Rohlf F.J. Biometry. The principals and practice of statistics in biological research. NY.: W.H. Freeman and Co, 1995. 887 p.
- Stensmyr M.C., Urru I., Collu I. et al. Rotting smell of dead — horse arum florets // *Nature.* 2002. Vol. 420. P. 625–626. DOI: 10.1038/420625a.
- Tang X., Cao A., Zhang Y. et al. Effects of soil factors on dimethyl disulfide desorption and the risk of phytotoxicity to newly-planted seedlings // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2023. Vol. 262. P. 115313. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2023.115313.
- Yan D., Cao A., Wang Q. et al. Dimethyl disulfide (DMDS) as an effective soil fumigant against nematodes in China // *PLoS ONE.* 2019. Vol. 14(10). P. e0224456. DOI: 10.1371/journal.pone.0224456.
- Yu J., Land C.J., Vallad G.E., Boyd N.S. Tomato tolerance and pest control following fumigation with different ratios of dimethyl disulfide and chloropicrin // *Pest. Manage Sci.* 2019. Vol. 75(5). P. 1416–1424. DOI: 10.1002/ps.5262.

REFERENCES

- Bejm A.M. Ekologo-toksikologicheskie kriterii reglamentacii metilsernistyh soedinenij v stochnyh vodah sulfat-cellyuloznogo proizvodstva [Ecological and toxicological criteria for the regulation of methyl sulfur compounds in wastewater from sulfate-cellulose production]. M., VNIPIELlesprom, 1984, vyp. 8. 34 p. (In Russian)
- Chamorro M., Seijo T.E., Noling J.C. et al. Efficacy of fumigant treatments and inoculum placement on control of *Macrophomina phaseolina* in strawberry beds. *Crop Prot.*, 2016, vol. 90, pp. 163–169. doi: 10.1016/j.cropro.2016.08.020.
- Conkle J.L., Cabrera J.A., Thomas J.E. et al. Effects of CO₂ dissolution on phase distribution and degradation of dimethyl disulfide in soils under grape production. *Pest. Manage Sci.*, 2016, vol. 72(2), pp. 349–353. doi: 10.1002/ps.4004.
- Dyusengaliev K.I., Saginaeva A.T., Kulbatyrov D.K. et al. Fiziko-himicheskie harakteristiki substitov disulfidnogo masla uglevodorodnogo syr'ya [Physico-chemical characteristics of the crude disulfide oil substitutes]. *Neftegazovoe delo*, 2016 no. 5, pp. 125–139. doi: 10.17122/ogbus-2016-5-125-139. (In Russian)
- ECHA, 2010. Dimethyl Disulfide Registration Dossier. (<https://echa.europa.eu/registration-dossier/-/registered-dossier/13671>).
- ECHA, 2012. Guidance on Information Requirements and Chemical Safety Assessment. (<https://echa.europa.eu/guidance-documents>).
- Gómez-Tenorio M.A., Zanón M.J. et al. Efficacy of dimethyl disulfide (DMDS) against *Meloidogyne* sp. and three formae speciales of *Fusarium oxysporum* under controlled conditions. *Crop Prot.*, 2015, vol. 78, pp. 263–269. doi: 10.1016/j.cropro.2015.09.013.

- Kiragosyan K., Picard M., Sorokin D. et al. Effect of dimethyl disulfide on the sulfur formation and microbial community composition during the biological H₂S removal from sourgas streams. *J. Hazard. Mater.*, 2020, vol. 386, pp. 121916. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121916.
- Koptyaev V.G. Eksperimental'nye dannye po obosnovaniyu predel'no dopustimoy koncen-tracii dimetilsul'fida v vodoyomah [Experimental data on the justification of the maximum permissible concentration of dimethyl sulfide in reservoirs]. *Gigiena i sanitariya*, 1967, vol. 32(3), pp. 3–7. (In Russian)
- Liang Z., An T., Li G., Zhang Z. Aerobic biodegradation of odorous dimethyl disulfide in aqueous medium by isolated *Bacillus cereus* GIGAN2 and identification of transformation intermediates. *Bioresour. Technol.*, 2015, vol. 175, pp. 563–568. doi: 10.1016/j.biortech.2014.11.002.
- Ljunggren G., Norberg B. On the Effect and Toxicity of Dimethyl Sulfide, Dimethyl Disulfide and Methyl Mercaptan. *Acta Physiol.*, 2008, vol. 5, no. 2–3, pp. 248–255. doi: 10.1111/j.1748-1716.1943.tb02053.x.
- Mao L., Yan D., Wang Q. et al. Evaluation of the combination of dimethyl disulfide and dazomet as an efficient methyl bromide alternative for cucumber production in China. *J. Agric. Food Chem.*, 2014, vol. 62, no. 21, pp. 4864–4869. doi: 10.1021/jf501255w.
- Meshchakova N.M., Benemanskij V.V. Ocenka biologicheskogo dejstviya dimetildisul'fida s uchetom specificheskikh otdalennyh effektov [Biological influence assessment of dimethylsulfide taking into account specific postponed effects]. *Byulleten' Vostochno-Sibirskogo nauchnogo centra Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akademii medicinskih nauk*, 2005, no. 2 (40), pp. 209–212. (In Russian)
- Metodika biotestirovaniya toksichnosti vody i vodnyh vytyazhek iz pochv, osadkov stochnyh vod i othodov po smertnosti i izmeneniyu plodovitosti ceriodafnij [The method of biotesting the toxicity of water and aqueous extracts from soils, sewage sludge and waste on mortality and changes in the fertility of ceriodaphnia]. Federal'nye reestr (FR). FR 1.39.2007.03221. Moscow, AKVAROS, 2007. 56 p. (In Russian)
- Metodika opredeleniya toksichnosti vod, vodnyh vytyazhek iz pochv, osadkov stochnyh vod i othodov po izmeneniyu urovnya fluorescencii hlorofilla i chislennosti kletok vodoroslej [A method for determining the toxicity of waters, water extracts from soils, sewage sludge and waste by changing the level of chlorophyll fluorescence and the number of algae cells]. Federal'nyj reestr (FR) FR.1.39.2007.03223. Moscow, AKVAROS. 2007. 47 p. (In Russian).
- Metody ispytaniya himicheskoy produkcii, predstavlyayushchej opasnost' dlya okruzhayushchej sredy. Ostraya toksichnost' dlya embrionov ryby. (OECD, Test No. 236:2013, MOD) [Methods of testing chemical products that pose a danger to the environment. Acute toxicity to fish embryos. (OECD, Test No. 236:2013, MOD)]. Moscow: “Standartinform”, 2016. 30 p. (in Russian).
- Metody ocenki toksicheskogo vliyaniya fitocenozov planktona na formirovanie kachestva poverhnostnyh vod sushi [Methods for assessing the toxic effect of phytocenoses of plankton on the formation of the quality of surface waters]. Rostov-on-Don, Rosgidromet, 2014. 43 p. (in Russian).
- Mount D.I., Norberg T.J. A seven-day life-cycle cladoceran toxicity test. *Environ. Toxicol. Chem.*, 1984, vol. 3, pp. 425–434.
- Obzor rynka disul'fidnogo masla v Rossii: analit. obzor [Overview of the disulfide oil market in Russia: Analyte review]. Issledovatel'skaya gruppa “Infomajn”. Moscow, Infomajn, 2012. 107 p. (In Russian)
- Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote po teme: “Razrabotka nauchno-obosnovannogo normativa predel'no-dopustimoy koncentracii (PDK) na dimetildisul'fid dlya vodoemov rybohozyajstvennogo znacheniya” [Report on the research work on the topic: “Development of a scientifically based standard of maximum permissible concentration (MPC) for dimethyl disulfide for reservoirs of fishery importance]. Borok. 2023. 71 p. (In Russian)
- Pasport bezopasnosti dimetildimul'fida (nomer 004111-001 (versiya 4.0). ARKEMA France. 2010. 9 p.
- Probit Analysis: A Statistical Treatment of the Sigmoid Response Curve (ed. D. J. Finney). NY.-London, Cambridge Univ. Press, 1952. 318 p.
- Rupp T., Oelschlagel B., Rabitsch R. et al. Flowers of Deceptive *Aristolochia microstoma* Are Pollinated by Phorid Flies and Emit Volatiles Known From Invertebrate Carrion. *Front. Ecol. Evol.*, Sec. Chemical Ecology, 2021, vol. 9, article 658441. doi: 10.3389/fevo.2021.658441.
- Selyuzhickij G.V. Eksperimental'nye dannye k obosnovaniyu PDK metilmerkaptana, dimetilsul'fida i dimetildisul'fida v vozduhe rabochej zony cellyulozno-bumazhnyh predpriyatij [Experimental data to substantiate the MPC of methyl mercaptan, dimethyl sulfide and dimethyl disulfide in the air of the working area of pulp and paper enterprises]. *Gigiena truda*, 1972, no. 6, pp. 46–47. (In Russian)
- Selyuzhickij G.V., Garbuz A.M., Kandybor N.P. et al. Gigiena truda v cellyulozno-bumazhnoj promyshlennosti [Occupational hygiene in the pulp and paper industry]. Moscow, Lesnaya promyshlennost', 1989. 216 p. (In Russian)
- Sokal R.R., Rohlf F.J. Biometry. The principals and practice of statistics in biological research. NY., W.H. Freeman and Co, 1995. 887 p.
- Stensmyr M.C., Urru I., Collu I., Celandier M., Hansson B.S., Angioy A.M. Rotting smell of dead — horse arum florets. *Nature*, 2002, vol. 420, pp. 625–626. doi: 10.1038/420625a.
- Tang X., Cao A., Zhang Y., et al. Effects of soil factors on dimethyl disulfide desorption and the risk of phytotoxicity to newly-planted seedlings. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2023, vol. 262, pp. 115313. doi: 10.1016/j.ecoenv.2023.115313.
- Yan D, Cao A, Wang Q, Li Y, Canbin O, Guo M, et al. Dimethyl disulfide (DMDS) as an effective soil fumigant against nematodes in China. *PLoS ONE*, 2019, vol. 14(10), e0224456. doi: 10.1371/journal.pone.0224456.

Yu J., Land C.J., Vallad G.E., Boyd N.S. Tomato tolerance and pest control following fumigation with different ratios of dimethyl disulfide and chloropicrin. *Pest Manage Sci.*, 2019, vol. 75(5), pp. 1416–1424. doi: 10.1002/ps.5262.

THE EFFECT OF DIMETHYL DISULFIDE ON BIOLOGICAL INDICATORS OF TEST-ORGANISMS OF DIFFERENT SYSTEMATIC GROUPS

G. M. Chuiko^{1,*}, I. I. Tomilina^{1,}, N. S. Shevchenko¹,
O. A. Ugarova¹, E. I. Golovkina¹, M. V. Medyankina²**

¹*Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences,
152742 Borok, Russia, e-mail: *gchuiko@ibiw.ru, **i_tomilina@mail.ru*

²*Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky,
109004 Moscow, Zemlyanoy Val str., 73*

Revised 11.11.2024

New data on the effect of dimethyl disulfide on hydrobionts of different systematic groups were obtained. The threshold concentrations of DMDS, established with the chronic effect of DMDS on the growth of cells of the algae *Chlorella vulgaris* — 0.05 mg/L, on the reproductive parameters of *Ceriodaphnia affinis* — 5.0 mg/L, the occurrence of pathomorphological and pathoanatomic changes in adult fish *Danio rerio* — 5.0 mg/L. The change in the number of cells of the green algae *Chlorella vulgaris* is the most sensitive test function. The established toxicological parameters can be used to determine the hazard class and adjust the standards for the content of DMDS in water.

Keywords: dimethyl disulfide, algae, crustaceans, fish, toxicity