

# ОБНАРУЖЕНИЕ фитотоксичности НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА

## при их ВОЗДЕЙСТВИИ НА ВОДНЫЙ МАКРОФИТ *Ceratophyllum demersum*

**Изучали взаимодействия наночастиц золота (Au) с водными растениями *Ceratophyllum demersum* в условиях микрокосмов. После добавления наночастиц золота (Au) в водную среду микрокосмов, содержащих макрофиты *C. demersum*, анализировали состояние растений. Впервые показана фитотоксичность наночастиц Au для водных макрофитов. Предложен и успешно апробирован новый метод выявления фитотоксичности. Полученные данные добавляют новую информацию к имеющимся знаниям о фитотоксичности металлов, а также вносят вклад в нанотоксикологию.**

### Введение

Увеличение поступления в водные экосистемы различных химических веществ делает актуальной задачи экологического и экотоксикологического мониторинга, оценки опасности химических веществ, изучения различных аспектов взаимодействий между поступающими в биосферу химическими веществами и организмами [1-5]. В рамках этих исследований изучали различные аспекты взаимодействий поллютантов с водными макрофитами в условиях лабораторных микрокосмов [6-9].

Золото (Au) — тяжелый металл первой группы и шестого периода системы элемен-

**С.А. Остроумов\***,

доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник биологического факультета, ФГОУ ВПО Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

**В.А. Поклонов,**

аспирант биологического факультета, ФГОУ ВПО Московский государственный университет имени

М.В. Ломоносова;

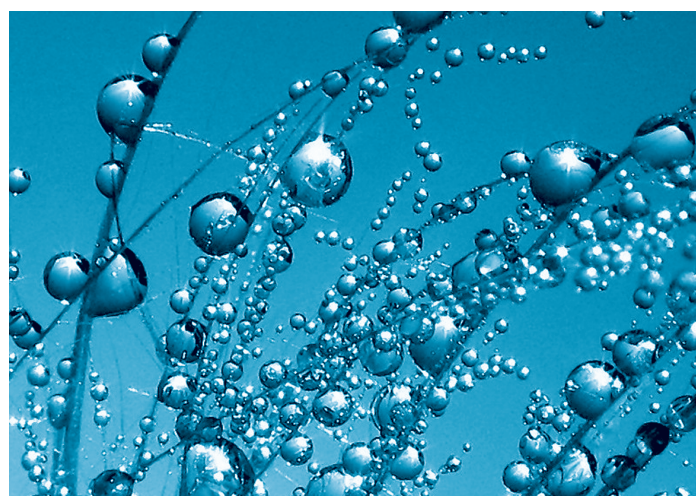
**С.В. Котелевцев,**

доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник биологического

факультета, ФГОУ ВПО Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;

**С.Н. Орлов,** док-

тор биологических наук, заведующий лабораторией биологического факультета, ФГОУ ВПО Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова



тов Д.И. Менделеева, с атомным номером 79, атомный вес  $196,9665 \pm 1$ . Биологические эффекты этого элемента изучены меньше, чем воздействия других тяжелых металлов [10, 11]. В связи с разработкой возможностей использования наночастиц золота (gold nanoparticles, AuNPs) в медицинских целях, в том числе для диагностики и терапии рака, болезни Альцгеймера, артрита, ВИЧ, туберкулеза [11], представляет интерес изучение всего спектра возможных биологических эффектов, вызываемых различными препаратами Au. Некоторые препараты Au (I) токсичны, накапливаются в почках, в меньшей степени в печени, селезенке и гипоталамусе; накопление в почках может привести к их заболеванию, а также к дерматитам, стоматитам, тромбоцитопении [10]. В научной литературе отсутствовала информация о взаимодействиях наночастиц Au с водными макрофитами, отсутствовали сведения о том, могут ли наночастицы золота проявлять фитотоксическое действие в отношении высших водных

\*Адрес для корреспонденции: ar55@yandex.ru;

**Таблица 1**

Биомасса макрофитов *Ceratophyllum demersum* в микрокосмах, использованных для инкубации в присутствии НРЧ Au

Номер микрокосма	Биомасса макрофитов <i>C. demersum</i> (сырой вес), г
1	4,5
2	3,
3	4,4
4	3,4
5	1,9
6	2,3

растений. Современные задачи исследований экотоксикологии и химико-биотических взаимодействий [12-18] делают необходимым получение научных сведений о потенциальной токсичности максимально широкого спектра химических веществ и продуктов, в том числе наночастиц.

Цель данной работы — выяснить, могут ли наночастицы золота оказывать токсическое воздействие на водные организмы — высшие водные растения *Ceratophyllum demersum* L.

## Материалы и методы исследования

Эксперименты проводились в пресноводных микрокосмах, которые были созданы с участием массово встречающегося вида пресноводных организмов — водных растений *Ceratophyllum demersum* L. В соответствии с ранее отработанной методикой содержания макрофитов в лабораторных условиях [6, 8, 9], в микрокосмы вносили водные макрофиты и отстоянную водопроводную воду (ОВВ). Растения *Ceratophyllum demersum* собраны в пруду в пойме р. Москвы в ее верхнем течении.

Макрофиты *C. demersum* инкубировали в микрокосмах из прозрачного полимерного материала в условиях естественной фотопериодичности. В каждом микрокосме находилось по 500 мл ОВВ и макрофиты — в количестве, соответствующем биомассе 2-4 г сырого веса (табл. 1). Температура воды 20 °С. В микрокосмы были добавлены препараты коллоидных наноразмерных частиц (НРЧ) золота (Au) размером 20±5 нм. Препарат НРЧ содержал  $3 \cdot 10^{-4}$  М Au. Объем добавок в микрокосмах №1 и №2 — по 2 мл, в микрокосмах №3 и №4 — по 6 мл. Режим добавок: сделано по 5 добавок в каждый микрокосм. Первая добавка была

сделана в начале инкубации. Последующие добавки были сделаны на 3, 8, 17 и 25 сут инкубации. Через 28 сут инкубация была закончена. Суммарное внесение Au в микрокосмах №№1-4 после последней пятой добавки составило:

в микрокосмах №1 и №2 после внесения пяти добавок по 2 мл —  $6 \cdot 10^{-6}$  М;

в микрокосмах №3 и №4 после внесения пяти добавок по 6 мл —  $1,8 \cdot 10^{-5}$  М.

Микрокосмы №5 и №6 служили контролем — наночастицы золота в них не добавляли.

## Ключевые слова:

гидробионты, водные микрокосмы, макрофиты, наночастицы, Au, *Ceratophyllum demersum*

## Результаты и их обсуждение

Состояние макрофитов в ходе инкубации охарактеризовано в табл. 2.

Отметим, что в течение инкубации микрокосмов с макрофитами в течение первых суток не было отмечено проявлений фитотоксичности НРЧ.

Через 17 сут проявились признаки фитотоксичности. Через 24-28 сут признаки фитотоксичности были выражены значительно.

Опыты показали, что в условиях опыта при суммарном добавлении НРЧ Au  $1,8 \cdot 10^{-5}$  М проявляется заметно выраженная фитотоксичность через 24 сут.

При суммарном добавлении НРЧ Au  $6 \cdot 10^{-6}$  М также проявляются некоторые признаки фитотоксичности, но в менее выраженной степени.

Отметим, что при воздействии НРЧ Au наряду с гибелью части побегов отмечались сублетальные эффекты, связанные с расположением побегов растений в столбе воды. При токсическом сублетальном воздействии побеги располагались в столбе воды в среднем ниже, чем в контроле. В контроле все побеги плавали в верхней части столба воды и не касались дна, а при воздействии НРЧ Au побеги опускались ниже и некоторые из них касались дна. Аналогичные сублетальные эффекты отмечены нами и при наблюдении макрофитов, которые были инкубированы в присутствии таких тяжелых металлов, как Cu, Zn, Cd и Pb, а также при инкубации макрофитов в присутствии органического поллютанта (додецилсульфата натрия). Это указывает на то, что нами был найден и использован новый метод обнаружения и характеристики сублетальных проявлений фитотоксичности при воздействии поллютантов на водные растения *C. demersum*.

**Таблица 2**

Состояние макрофитов *Ceratophyllum demersum* в течение инкубации в присутствии НРЧ Au

Номер микрокосма	Величины добавок (мл)	Суммарно внесено (в расчете на 1 л)	Проявление фитотоксичности через 17 сут	Проявление фитотоксичности через 24 сут	Проявление фитотоксичности через 28 сут
1	2	6·10 <sup>-6</sup> М	Почти все побеги плавают, 1-2 побега упираются в дно.	Растения занимают верхние 70-80% столба воды.	Зона расположения растений в столбе воды шире, чем в контроле, часть растений расположена ниже, чем в контроле. Некоторые побеги упираются в дно. Погибло 20% побегов.
2	2				
3	6	1.8·10 <sup>-5</sup> М	Часть побегов опустилась на дно микрокосмов; начинается гибель концевых участков некоторых побегов.	Растения занимают весь столб воды; часть побегов упирается в дно или лежит на дне. Заметна гибель 40-50% побегов	Растения занимают весь столб воды, включая придонную зону. Часть побегов упирается в дно или лежит на дне. Погибло 50% побегов
4	6				
5	0	0	Все побеги плавают в верхней части микрокосмов. Побегов, упирающихся в дно, нет.	Все побеги плавают в верхней части микрокосмов. Зона расположения макрофитов находится выше, чем в сосудах 1-4. Побегов, упирающихся в дно, нет. Погибло менее 10% побегов.	Все побеги плавают в верхней части микрокосмов. Зона расположения макрофитов находится выше, чем в сосудах 1-4. Побегов, упирающихся в дно, нет. Погибло менее 10-15% побегов.
6	0				

Полученные результаты дополняют ранее накопленные сведения об экотоксикологии металлов [1, 2, 4, 5] и фитотоксичности химических веществ (например, [3, 6-9]), о важных для экобезопасности сторонах химико-биотических взаимодействий в водной среде [12-26].

## Заключение

Впервые получены данные, которые показывают, что наночастицы Au могут оказывать токсическое воздействие на водные макрофиты.

В условиях опыта в микрокосме установлено токсическое воздействие наночастиц Au на макрофит *Ceratophyllum demersum*.

Токсическое воздействие проявилось при достаточно длительном воздействии в течение 17 сут и более.

При увеличении суммарной концентрации НРЧ до 1.8·10<sup>-5</sup> М фитотоксические эффекты проявлялись раньше, чем при суммарной концентрации 6·10<sup>-6</sup> М.

Разработан и успешно апробирован новый эффективный метод оценки фитотоксичности водорастворимых или взвешен-

ных в воде веществ, который заключается в анализе расположения побегов макрофитов в столбе воды.

Авторы благодарны Ю.А. Моисеевой, Е.А. Соломоновой и другим сотрудникам МГУ им. М.В. Ломоносова и Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН за помощь и обсуждение.

## Литература

1. Ивантер Э. В. Экологическая токсикология природных популяций / Э. В. Ивантер, Н. В. Медведев М.: Наука, 2007. 229 с.
2. Ермаков В. В. Геохимическая экология животных / В. В. Ермаков, С. Ф. Тютиков. М.: Наука, 2008. 315 с.
3. Остроумов С. А. Тритон X-100 // Токсикологический вестник. 1999. № 4. С. 41.
4. Остроумов С. А. Сульфат кадмия: действие на мидий // Токсикологический вестник. 2004. № 6. С. 36–37.
5. Остроумов С. А. Фтортитанат калия (воздействие на фильтрацию воды мидиями *Mytilus galloprovincialis*) // Токсикологический вестник. 2007. № 3. С. 39–40.
6. Остроумов С. А. Синтетическое моющее средство «Аист-Универсал»: воздействие на *Fontinalis*

- antipyretica* Hedw / С.А. Остроумов, Е.А. Соломонова // Токсикологический вестник. 2007. № 1. С. 40–41.
7. Остроумов С.А. Синтетическое моющее средство «Аист-Универсал»: воздействие на прорастание семян и удлинение проростков гречихи *Fagopyrum esculentum* / С.А. Остроумов, Е.А. Соломонова // Токсикологический вестник. 2007. № 5. С. 42–43.
8. Остроумов С.А. Исследование взаимодействия додецилсульфата натрия с водными макрофитами в экспериментальных условиях / С.А. Остроумов, Е.А. Соломонова // Токсикологический вестник. 2008. № 4. С. 21–26.
9. Соломонова Е.А. Воздействие додецилсульфата натрия на биомассу макрофитов *Najas guadelupensis* L. / Е.А. Соломонова, С.А. Остроумов // Токсикологический вестник. 2009. № 2. С.32–35.
10. Стрижко В.С. Золото / В.С. Стрижко, М.А. Меретуков // Химическая энциклопедия. 1990. Т. 2. С. 334–338.
11. Boisselier E. Gold nanoparticles in nanomedicine: preparations, imaging, diagnostics, therapies and toxicity / Boisselier E., Astruc D. // Chem. Soc. Rev. 2009. V. 38 (6). P. 1759–1782.
12. Добровольский Г.В. К 80-летию выхода в свет книги В.И. Вернадского «Биосфера». Развитие некоторых важных разделов учения о биосфере // Экологическая химия. 2007. Т. 16 (3). С. 135–143.
13. Моисеенко Т.И. Водная экотоксикология: теоретические и прикладные аспекты. М.: Наука, 2009. 400 с.
14. Моисеенко Т.И. Микроэлементы в поверхностных водах суши и особенности их водной миграции / Т.И. Моисеенко, Н.А. Гашкина // Доклады Академии наук. 2005. Т. 405. № 3. С. 395–400.
15. Ермаков В.В. О книге «Гидробионты в самоочищении вод и биогенной миграции элементов» // Вода: химия и экология. 2009. № 8. С. 25–29.
16. Rand G. Fundamentals of Aquatic Toxicology. Philadelphia: Taylor and Francis, 1995. 1126 p.
17. Остроумов С.А. Гидробионты в самоочищении вод и биогенной миграции элементов. М.: МАКС Пресс, 2008. 200 с.
18. Химико-биотические взаимодействия. Библиографическая информация // Электронный ресурс <http://www.scribd.com/doc/62341906/>
19. Abakumov V.A. New in the study of modern problems environmental science and ecology, including research on water ecosystems and organisms // Achievements in Life Sciences. 2012. № 5. P. 121-126.
20. Abakumov V.A. A review of some achievements in environmental sciences, general ecology and aquatic ecology: functioning of ecosystems and environmental toxicology // Ecological Studies, Hazards, Solutions. 2013. V.18. P. 7–15.
21. Ermakov V.V. Towards a new ecology and environmental science. (Review, bibliography of selected papers and books) / V.V. Ermakov, O.M. Gorshkova // Ecological Studies, Hazards, Solutions. 2013. V.18. P. 29-46.
22. Asharani P.V. Comparison of the toxicity of silver, gold and platinum nanoparticles in developing zebrafish embryos / P.V. Asharani, Y. Lianwu, Z. Gong, S. Valiyaveetil // Nanotoxicology. 2011. V. 5 (1). P. 43-54.
23. Taylor U. Toxicity of gold nanoparticles on somatic and reproductive cells / U. Taylor, A. Barchanski, W. Garrels, S. Klein, W. Kues, S. Barcikowski, D. Rath // Adv. Exp. Med. Biol. 2012. V. 733. P. 125-133.
24. Johnson, Monique E. Study of the interactions between *Elodea canadensis* and CuO nanoparticles / Monique E. Johnson, S.A. Ostroumov, J.F. Tyson, B. Xing // Russian Journal of General Chemistry. 2011. V. 81 (13). P. 2688-2693.
25. Ostroumov S.A. Toxicology of nanomaterials and environment / S.A. Ostroumov, S.V. Kotelevtsev // Ecologica. 2011. V. 18 (61). P. 3–10.
26. Ostroumov S.A. Effects of three types of metal oxide nanoparticles (TiO<sub>2</sub>, CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) on the seedlings of the higher plant *Lens culinaris* / S.A. Ostroumov, B. Xing // Ecologica. 2012. V. 19 (65). P.10-14.

S.A. Ostroumov, V.A. Poklonov, S.V.Kotelevtsev, S.N.Orlov

## DISCOVERY OF PHYTOTOXICITY OF GOLD NANOPARTICLES AS A RESULT OF THEIR EFFECTS ON THE AQUATIC MACROPHYTE *Ceratophyllum demersum*.

Interactions of gold (Au) nanoparticles and the aquatic macrophyte *Ceratophyllum demersum* under conditions of microcosms were studied. It was shown for the first time that gold nanoparticles exhibit some phytotoxicity to aquatic macrophytes. A new method of phytotoxicity detection was suggested and successfully applied. Obtained data contributed to knowledge of phytotoxicity of metals and nanotoxicology.

**Key words:** aquatic organisms, aquatic microcosms, macrophytes, nanoparticles, Au, *Ceratophyllum demersum*.