

Научная статья
УДК 54.057; 615.91
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.044

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНОСИЛИКАТНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОТОТИПОВ И ИХ ТОКСИЧНОСТЬ ДЛЯ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ

Галина Олеговна Калашникова¹, Евгений Константинович Папынов², Олег Олегович Шичалин^{3, 4}, Мария Васильевна Смирнова⁵, Алёна Алексеевна Койгерова⁶, Дарья Владимировна Грязнова⁷, Иван Сергеевич Плаунов⁸, Игорь Валентинович Смирнов⁹, Иван Гундарович Тананаев^{10, 11}, Виктор Нестерович Яковенчук¹²

^{1, 3, 7, 10}Федеральный исследовательский центр Кольский научный центр Российской академии наук (Центр наноматериаловедения), Апатиты, Россия

^{2, 4}Дальневосточный федеральный государственный университет, Владивосток, Россия

^{5, 6}Федеральный исследовательский центр Кольский научный центр Российской академии наук (Научный центр медико-биологических исследований адаптации человека в Арктике), Апатиты, Россия

⁸Мурманский арктический университет, Мурманск, Россия

⁹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

¹¹Федеральный исследовательский центр Кольский научный центр Российской академии наук, Апатиты, Россия

¹²Геологический институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

¹g.kalshnikova@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4857-0884>

²papynov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1185-7718>

³oleg_shich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2441-6209>

⁵m.smirnova@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9920-1114>

⁶a.koygerova@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8843-0122>

⁷d.gryaznova@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6836-9168>

⁸plauinov@list.ru

⁹igor_smirnov@khlopin.ru

¹⁰i.tananaev@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2159-8182>

¹²v.yakovenchuk@ksc.ru

Аннотация

Приведены результаты тестирования риска влияния синтетических аналогов титаносиликатных минералов линтисита, зорита, иванюкита, ситинакита и натисита на живые организмы при помощи проведения исследований с использованием раствора, моделирующего состав искусственной плазмы крови (ИПК) (модель *in vitro*), и плодовой мухи *Drosophila melanogaster* (модель *in vivo*).

Ключевые слова:

титаносиликат, синтез, анализ, токсичное влияние

Благодарности:

авторы выражают благодарность сотрудникам ИППЭС ФИЦ КНЦ РАН (И. Р. Елизаровой и М. Б. Малышевой) за помощь в проведении анализов состава растворов, сотрудникам ГИ ФИЦ КНЦ РАН (Я. А. Пахомовскому, А. В. Базай) за помощь в получении SEM-снимков образцов, А. А. Смирнову (ИХТРЭМС ФИЦ КНЦ РАН) за помощь в оформлении материалов.

Финансирование:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра наноматериаловедения FMEZ–2025–0051 и при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение о предоставлении гранта № 075-15-2025-585).

Для цитирования:

Функциональные материалы на основе титаносиликатных природных прототипов и их токсичность для живых организмов / Г. О. Калашникова [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 1. С. 252–256. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.044.

Original article

FUNCTIONAL MATERIALS BASED ON TITANOSILICATES NATURE PROTOTYPES AND THEIR TOXIC INFLUENCE ON LIVING ORGANISMS

Galina O. Kalashnikova¹, Evgeniy K. Papynov², Oleg O. Shichalin^{3, 4}, Maria V. Smirnova⁵, Alyona A. Koygerova⁶, Darya V. Gruaznova⁷, Ivan S. Plaunov⁸, Igor V. Smirnov⁹, Ivan G. Tananaev^{10, 11}, Victor N. Yakovenchuk¹²

© Калашникова Г. О., Папынов Е. К., Шичалин О. О., Смирнова М. В., Койгерова А. А., Грязнова Д. В., Плаунов И. С., Смирнов И. В., Тананаев И. Г., Яковенчук В. Н., 2025

^{1, 3, 7, 10}Federal Research Centre Kola Science Centre of the RAS (Nanomaterials Research Centre), Apatity, Russia

^{2, 4}Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

^{5, 6}Federal Research Centre Kola Science Centre of the RAS (Scientific Center for Biomedical Research on Human Adaptation in the Arctic), Apatity, Russia

⁸Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia

⁹St. Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

¹¹Federal Research Centre Kola Science Centre of the RAS, Apatity, Russia

¹²Geological Institute of the Kola Science Centre of the RAS, Apatity, Russia

¹g.kalshnikova@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4857-0884>

²papynov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1185-7718>

³oleg_shich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2441-6209>

⁵m.smirnova@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9920-1114>

⁶a.koygerova@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8843-0122>

⁷d.gryaznova@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6836-9168>

⁸plaunov@list.ru

⁹igor_smirnov@khlopin.ru

¹⁰i.tananaev@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2159-8182>

¹²v.yakovenchuk@ksc.ru

Abstract

This study presents the results of risk assessment regarding the impact of synthetic analogs of the titanosilicate minerals lintsite, zorite, ivanyukite, sitinakite, and natisite on living organisms. This was achieved through experiments using a solution that simulates the composition of artificial blood plasma (*in vitro* model) and the fruit fly *Drosophila melanogaster* (*in vivo* model).

Keywords:

titanosilicate, synthesis, analysis, toxic influence

Acknowledgments:

The authors express their gratitude to the staff of INEP FRC KSC RAS (Elizarova I. R. and Malysheva M. B.) for their assistance in conducting the analysis of the solution composition, to the staff of GI FRC KSC RAS (Pakhomovsky Ya. A. and Bazai A. V.) for their assistance in obtaining SEM-images of the samples, and to Smirnov A.A. (ICTREMRM FRC KSC RAS) for his assistance in the preparation of the materials.

Funding:

The work was supported by the framework of the state assignment of the Center for Nanomaterial Science FMEZ–2025-0051 and the Ministry of Science and Higher Education of Russia (grant agreement No 075-15-2025-585).

For citation:

Functional materials based on titanosilicates nature prototypes and their toxic influence on living organisms / G. O. Kalashnikova [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 252–256. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.044.

Введение

Drosophila melanogaster (Meigen.) (плодовая муха) является идеальной моделью для *in vivo* исследований, в первую очередь генотоксичности, из-за значительного количества генов, идентичных человеческим (более 60 %) и почти 75 % генов, имеющих функциональные гомологи и связанных с заболеваниями человека [1]. В настоящее время дрозофилу рассматривают еще и как модель для токсикологических исследований, разрабатываются протоколы тестов с оценкой состояния разных стадий ее развития [2].

Для проведения экспериментов *in vivo* использовали методику Азаровой [3] с незначительной модификацией. Объектами исследования были выбраны образцы АМ-4 (аналог линтисита), ЕТС-4 (аналог зорита), СИВ (аналог иванюкита) и синтетический аналог ситинакита и натисита. Эксперимент проводили в трех параллелях в пробирках 30 × 150 мм (высота пробирок обеспечивает правильность выполнения анализа на высоту куколок). В опытную среду подмешивали исследуемые пробы в пропорции 1:3, представляющие собой взвесь в 5 %-м этаноле. Мух удаляли из пробирок через 72 ч после появления личинок и производили наблюдение. Эксперимент длился до начала массового окукливания личинок и вылета имаго. Просмотр куколок

и имаго осуществляли с помощью стереобинокулярного микроскопа MC-2-ZOOM вар. 2CR при увеличении 20 (Micromed, Китай, 2022).

Искусственная плазма крови человека (ИПК) — еще одна среда для проверки сорбционных свойств в условиях *in vitro* и, соответственно, потенциально гемолитических и цитологических характеристик, синтезируемых сорбентов, что важно и необходимо для понимания и прогнозирования их биосовместимости с живыми организмами [4].

Для приготовления раствора ИПК была использована методика авторов статьи [5], в которой приведены данные по оценке потенциальной биосовместимости и биоактивности материалов на основе волластонита, состав которых участвует в синтезе апатита в минерализованном модельном растворе крови. Для исследования *in vitro* были отобраны следующие образцы: AM-4, SL3 (протонированная форма AM-4), SIV, SIV-Cs₆₀₀ (керамика на основе SIV-Cs, полученная в результате электроимпульсного спекания при 600 °C), SIV-Cs₁₀₀₀ (керамика на основе SIV-Cs, полученная в результате спекания при 1 000 °C), SIV-Sr₁₀₀₀ (керамика на основе SIV-Sr, полученная в результате спекания при 1 000 °C).

Эксперимент проводили по следующей методике: в химический стакан объемом 600 мл отбирали 350 мл дистиллированной воды, в нем растворяли поочередно следующие соли: NaCl (4 г), NaHCO₃ (0,175 г), KCl (0,122 г), K₂HPO₄·3H₂O (0,114 г), MgCl₂ (0,128 г), CaCl₂ (0,139 г), Na₂SO₄ (0,0355 г). pH среды корректировали раствором 5M HCl с помощью pH-метра в пределах значения 7,4. Полученный раствор переводили в мерную колбу объемом 500 мл и доводили его до метки дистиллированной водой. Эксперименты проводили в термостойких химических стаканах при соотношении твердой и жидкой фаз (Т:Ж), равном 0,1 ± 0,05 г : 50 мл. Далее образцы выдерживали в термостате в течение 7 сут при температуре +41 °C. После этого отделяли твердую фазу от раствора и анализировали химический состав раствора. Температура +41 °C была выбрана на основании максимально возможной температуры жизнедеятельности организма человека, что позволило бы дать соответствующий прогноз поведения синтетического материала при экстремально возможной температуре тела человека.

Результаты

В случае экспериментов *in vivo* вес имаго был взят как параметр доступности питательных веществ из среды. Отмечены задержки прохождения стадий жизненного цикла *D. Melanogaster*. Соотношение полов по сравнению с контролем достоверно изменялось в пробах с аналогом ситинакита 20 мг/мл, SIV 10 мг/мл, ETS-4 мг/мл и AM-4 20 мг/мл, что может свидетельствовать о некотором стрессовом воздействии. Высота пупариев над средой достоверно уменьшалась по сравнению с контролем во всех концентрациях в случае образцов ситинакита, SIV, AM-4 и натисита. Можно предположить, что исследуемые пробы оказывают влияние на локомоторные функции личинок. По показателю массы имаго достоверные различия с контролем показали пробы SIV 10 мг/мл, натисит 1 и 10 мг/мл. Проба SIV 10 мг/мл оказала воздействие на *D. Melanogaster* по всем взятым параметрам оценки токсичности.

В случае экспериментов *in vitro* зафиксировано, что при контакте ИПК в случае всех сорбентов произошло увеличение концентрации катионов калия, натрия, магния и кальция в растворах после их контакта с ИПК. Исключением стал образец SIV, который при контакте с ИПК немного снизил в нем концентрацию катионов Mg²⁺ и Ca²⁺. Согласно полученным данным микроскопии, морфология поверхности керамических материалов значительно изменяется за 7 сут при постоянном контакте с ИПК. Визуально отмечено, что происходит нарастание нового рифленого матового слоя на поверхности всех образцов керамики SIV-Cs, SIV-Sr, который повторяет морфологию исходной поверхности образца. Химический состав слоя налета определить затруднительно вследствие недостаточной толщины слоя, тем не менее данную проблему можно решить при более длительном контакте материала с раствором ИПК и подготовкой полированного среза образца.

Выводы

На основании данных экспериментов с раствором ИПК можно сделать вывод, что минералоподобные материалы необходимо с осторожностью использовать при их контакте с биологическими жидкостями из-за подтверждения их способности оказывать влияние на химический состав растворов. В то же время необходимо отметить, что керамические материалы не подвергаются серьезным изменениям их морфологии и структуры поверхности, не разрушаются и не аморфизуются в процессе их обработки, что может быть полезным для кратковременного их использования в качестве керамических матриц ^{137}Cs в области медицинской радиохимии. Установлено, что все образцы могут оказывать влияние на химический состав растворов сложного состава в качестве сорбентов, а также влиять на живые организмы (на примере жизненного цикла *D. Melanogaster*).

Список источников

1. Demir E., Demir F. T. *Drosophila: a promising model for evaluating the toxicity of environmental pollutants* // *Karaelmas Sci Engin J.* 2022. V. 12 (1). P. 101–118.
2. Affleck J. G., Walker V. K. *Drosophila as a model for developmental toxicology: using and extending the Drosophotoxicology model* // *Methods Molr Biol.* 2019. V. 1965. P. 139–153.
3. Azarova S. V., Yazikov E. G., Ilinskikh N. N. Using biological testing for evaluation of the environmental hazardousness of waste produced by mining industry in the Republic of Khakassia // *Izvestiya Tomskogo Politeknicheskogo Universiteta.* 2004. V. 307 (4). P. 55–9.
4. Голубева О. Ю., Бразовская Е. Ю., Аликина Ю. А. Слоистые силикаты со структурой монтмориллонита: синтез, свойства и перспективы применения в медицине // Сборник тезисов VI Российского совещания по глинам и глинистым минералам «ГЛИНЫ-2023». 2023. С. 18–20.
5. Шичалин О. О. Гибридный микроволновой твердофазный синтез волластонита на основе природного возобновляемого сырья // *Журнал неорганической химии.* 2022. Т. 67, № 9. С. 1266–1273.

References

1. Demir E., Demir F. T. *Drosophila: a promising model for evaluating the toxicity of environmental pollutants.* *Karaelmas Sci Engin J.*, 2022, Vol. 12 (1), pp. 101–118.
2. Affleck J. G., Walker V. K. *Drosophila as a model for developmental toxicology: using and extending the Drosophotoxicology model.* *Methods Molr Biol.*, 2019, Vol. 1965, pp. 139–153.
3. Azarova S. V., Yazikov E. G., Ilinskikh N. N. Using biological testing for evaluation of the environmental hazardousness of waste produced by mining industry in the Republic of Khakassia. *Izvestiya Tomskogo Politeknicheskogo Universiteta*, 2004, Vol. 307 (4), pp. 55–9.
4. Golubeva O. Yu., Brazovskaya E. Yu., Alikina Yu. A. Sloistye silikaty so strukturoj montmorillonita: sintez, svojstva i perspektivy primeneniya v medicine [Layered silicates with montmorillonite structure: synthesis, properties, and prospects for medical applications]. *Sbornik tezisov VI Rossijskogo Soveshchaniya po glinam i glinistym mineralam "GLINY-2023"*, 2023, pp. 18–20.
5. Shichalin O. O. Gibridnyj mikrovolnovoj tverdogfaznyj sintez vollastonita na osnove prirodnogo vozobnovlyаемого syr'ya [Hybrid microwave solid-state synthesis of wollastonite based on natural renewable raw materials]. *Zhurnal neorganicheskoy himii*, 2022, vol. 67, no. 9, pp. 1266–1273. (In Russ.).

Информация об авторах

Г. О. Калашникова — кандидат химических наук, заведующий лабораторией;

Е. К. Папынов — кандидат химических наук, заведующий лабораторией;

О. О. Шичалин — кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, научный сотрудник;

М. В. Смирнова — научный сотрудник;

А. А. Койгерова — научный сотрудник;

Д. В. Грязнова — инженер;

И. С. Плаунов — магистр;

И. В. Смирнов — доктор химических наук, заведующий кафедрой;

И. Г. Тананаев — академик РАН, доктор химических наук, директор, заместитель генерального директора;
В. Н. Яковенчук — кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, старший научный сотрудник.

Information about the authors

G. O. Kalashnikova — PhD, Head of the Laboratory;
E. K. Papynov — PhD, Head of the Laboratory;
O. O. Shichalin — PhD, Leading Researcher, Researcher;
M. V. Smirnova — Researcher;
A. A. Koigerova — Researcher;
D. V. Gryaznova — Engineer;
I. S. Plaunov — M. Sc.;
I. V. Smirnov — DSc (Chemistry), Head of the Department;
I. G. Tananaev — Academician of RAS, DSc (Chemistry), Director, Deputy Director General;
V. N. Yakovenchuk — PhD, Leading Researcher, Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 18.08.2025; одобрена после рецензирования 08.09.2025; принята к публикации 22.09.2025.
The article was submitted 18.08.2025; approved after reviewing 08.09.2025; accepted for publication 22.09.2025.