

## ГЕНЕРАЦИЯ ГИПЕРЗВУКОВЫХ ВОЛН ПРИ ОБЛУЧЕНИИ КРЕМНИЯ СВЕТОМ, ИХ РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ВЛИЯНИЕ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ: КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Степанов А.В.<sup>1</sup>, Попов А.П.<sup>1</sup>, Коваленко А.В.<sup>1</sup>, Юманов Д.С.<sup>1</sup>, Димитриева А.И.<sup>1</sup>, Сергеева К.В.<sup>1</sup>, Дементьев Д.А.<sup>1</sup>, Никольская А.А.<sup>2</sup>, Туловчиков В.С.<sup>2</sup>, Тетельбаум Д.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Чувашский государственный аграрный университет,

ул. К. Маркса, 29, г. Чебоксары, 428003, РФ; e-mail: for.anton\_step@mail.ru

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.М. Лобачевского,

пр. Гагарина, 23, г. Нижний Новгород, 603022, РФ; e-mail: tetelbaum@phys.unn.ru

Поступила в редакцию 26.08.2023. DOI: 10.29039/rusjbpс.2023.0644

**Аннотация.** В данной работе представлено молекулярно-динамическое моделирование распространения гиперзвуковых волн в системах жидкость–твердое тело, таких как водные растворы NaCl и стекла (содержащие ионы Na); анализируется роль волноводных свойств кластеров Na<sup>+</sup>–(H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>-типа; обсуждается роль кластеров Na<sup>+</sup>–(H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>-типа в распространении гиперзвуковых волн. Взаимодействие между гиперзвуком и клеточными органеллами было исследовано численно и сопоставлено с биологическими экспериментами на семенах яровой мягкой пшеницы сорта Экада 70, в частности по влиянию указанного воздействия на их рост. гиперзвуковое облучение влияет на биометрические показатели яровой мягкой пшеницы, на массу семян и урожайность. При этом большое значение имеет время воздействия данного облучения. Наименьшая высота растений в варианте с облучением семенного материала в течение 30 минут – 71 с, а продуктивная кустистость составила 1,8. Показатели общей кустистости и среднего числа нормально развитых стеблей, дающих зерно на одно растение также были наилучшими в варианте с воздействием облучения семенного материала в течении 100 секунд, худшими в варианте в 30 минут. Отсюда можно сделать вывод о том, что гиперзвуковое облучение влияет на биометрические показатели яровой мягкой пшеницы, на массу семян и урожайность. При этом большое значение имеет время воздействия данного облучения. Полученные в результате моделирования данные показывают, что граница раздела двух сред вода-стекло является каналом передачи энергии от источника гиперзвуковых волн до биологического объекта.

**Ключевые слова:** эффект дальнего действия, гиперзвук, биологический эффект дальнего действия.

В настоящее время обозначилась тенденция производства экологически чистых продуктов питания, которая потребовала применения альтернативных методов, с минимально возможным уровнем техногенного загрязнения окружающей среды.

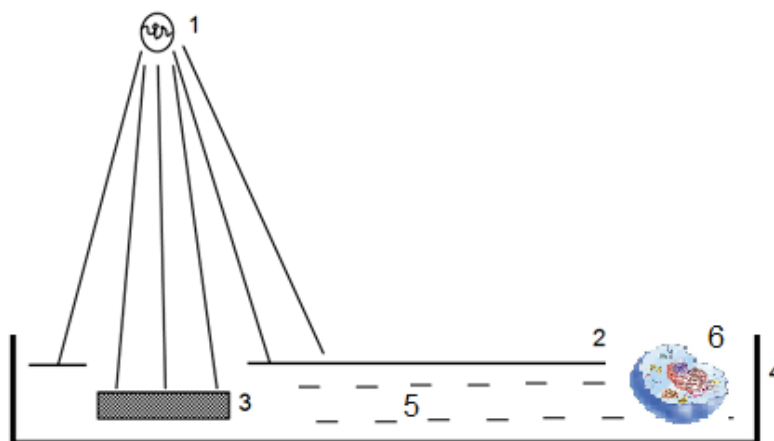
В отличие от химических методов обработки, физическое воздействие, поглощаясь в обрабатываемое растение, оказывает непосредственное влияние на процессы жизнедеятельности растения, но при этом не происходит внесения в растительный объект или в окружающую среду каких-либо экологически вредных химических веществ.

Данные многочисленных исследований свидетельствуют о том, что различные виды облучения семян оказывают положительное влияние на активацию жизненно важных процессов у растений при определенных условиях. Поэтому в настоящее время в сельском хозяйстве на практике достаточно широко применяются стимулирующие факторы, способствующие повышению энергии прорастания и полевой всхожести семенного материала.

Имеется множество работ, посвященных воздействию физических факторов (электрических и магнитных полей, ультрафиолетового, инфракрасного, лазерного облучения) на семенной материал, которое в свою очередь способствует повышению посевных качеств, выживаемости и урожайности. Однако остается необходимость в более детальном изучении механизма энергетического воздействия на внутреннюю структуру семени, рост и развитие растений, а также выбора установок эффективных, простых по конструкции, невысокой стоимостью и высокой надежностью.

Многочисленные исследования воздействия миллиметровых электромагнитных волн на живые организмы и ткани и их применения в медицине позволили сделать вывод об их важной функциональной роли [1]. При этом генерация и распространение таких электромагнитных волн сопровождается акустическими колебаниями и гиперзвуковыми волнами, которые являются главными действующими лицами вышеупомянутых эффектов [2,3]. Остаются без ответа вопросы, касающиеся механизма аномально большого радиуса действия облучения: световое облучение твердого тела, например, кремния, находящегося в контакте с системой, содержащей водный раствор NaCl (0,1-7%). При этом свойства другого образца изменяются даже если он находится на расстоянии нескольких сантиметров и более от облучаемого образца. Согласно предложенной модели, эффект обусловлен генерацией гиперзвуковых волн облученным образцом [4], а их распространение на большие расстояния связано с волноводными свойствами границы раздела раствор–твердое тело [5].

Предлагаемая вниманию, работа посвящена изучению влияния гиперзвуковых волн на посевные качества яровой мягкой пшеницы сорта Экада 70.



**Рисунок 1.** Экспериментальная схема для испытания биологического эффекта дальнего действия: 1 – светодиод, 2 – экран, 3 – кремниевая пластина, 4 – чашки Петри, 5 – вода, 6 – биологическая клетка или организм

Цель настоящего исследования – оценка влияния гиперзвуковых волн на посевные качества яровой мягкой пшеницы с помощью облучения в установке с кремниевой пластиной и выбором различных вариантов облучения по времени (100 секунд, 20 минут и 30 минут) и контрольный вариант (замачивание семян в воде).

В дополнение к экспериментальной проверке гипотезы влияния гиперзвука на живые организмы был проведен расчет по проверке гипотезы механизма распространения гиперзвука по границе раздела вода-стекло.

### МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

С целью получить практическое подтверждение представленному выше методу был проведен эксперимент. Предметом исследования стали семена яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Экада 70, которые были подвергнуты гиперзвуковому облучению с различным временем воздействия на семенной материал для того, чтобы проверить благотворное влияние гиперзвуковой стимуляции на семена яровой мягкой пшеницы: повышение энергии прорастания, всхожесть, рост урожайности.

Чтобы не исследовать дополнительные факторы, мы остановились на использовании дистиллированной воды.

Схема эксперимента выглядела следующим образом (рис. 1).

Система позволила облучать неподвижную массу семян, варьируя время воздействия: 100 секунд, 20 минут, 30 минут и Контроль (замачивание в воде без облучения). По каждому времени воздействия была 5-ти кратная повторяемость. В каждой повторяемости (пробе) было по 600 семян (на 1 м<sup>2</sup>).

В наших исследованиях прорастание семян характеризовалось двумя показателями: энергией прорастания [6], которую мы определяли на 4 сутки после посева и лабораторной всхожестью, которая характеризует способность семян давать полноценные проростки, и определяли мы ее на 7-8 сутки (табл. 1).

Семена проращивали в термостате в чашках на фильтровальной бумаге (повторность 4-х кратная). В каждой пробе было по 100 семян.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Энергия прорастания семян яровой мягкой пшеницы менялась в зависимости от времени воздействия на нее гиперзвукового облучения. Наивысшее ее значение отмечено при воздействии на нее в течение 100 секунд (72%), наименьшее в течении 30 минут (59%).

Наивысшее значение лабораторной всхожести составило 91% – при облучении в течение 100 секунд, наименьшее значение – 56% – при облучении в течение 30 минут.

**Таблица 1.** Влияние гиперзвукового облучения на энергию прорастания (рис. 2) и всхожесть семян (рис. 3)

Вариант	Энергия прорастания, %	Всхожесть семян, %	
		лабораторная	полевая
Контроль	66	82	81,6
100 секунд	72	91	85,7
20 минут	59	72	68,3
30 минут	58	56	54,2



**Рисунок 2.** Энергия прорастания семян яровой мягкой пшеницы сорта Экада 70, облученных гиперзвуковым излучением



**Рисунок 3.** Лабораторная всхожесть семян яровой мягкой пшеницы сорта Экада 70, облученных гиперзвуковым излучением

Формирование всходов, рост и развитие растений изучали в режиме реального времени. Массу снопов (с каждого повторности), высоту растений, длину стебля с колосом и длину колоса определяли, непосредственно после уборки урожая.

Самые ранние всходы появились на 9-е сутки из семян, обработанных в установке в течение 100 секунд. Стеблевой побег после выхода на поверхность развивал от 2 до 5 настоящих зеленых листьев, потом на некоторое время рост приостанавливался. В этот период закладывались и формировались вторичные корни и новые стеблевые побеги, образующие разветвление главного побега. Развивалась корневая система, наступала фаза кушения. Корневая система растений, облученных 100 секунд, была более развита по сравнению с контролем и облучением по 20 и 30 минут соответственно.

Облучение семян пшеницы гиперзвуковыми волнами влияло на биометрические показатели выросших из них растений (рис. 4 а, б).



**а**



**б**

**Рисунок 4** Растения яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Экада 70, выросших из семян, облученных 100 секунд, 20 минут, 30 минут и контрольного варианта

Таблица 2. Биометрические показатели яровой мягкой пшеницы.

№ п/п	Вариант	Высота растений	Кустистость		Количество междоузлий, шт.
			Общая	Продуктивная	
1.	Контроль	83	2,3	2,0	3,0
2.	100 секунд	90	2,5	2,2	3,3
3.	20 минут	74	2,1	1,9	2,8
4.	30 минут	71	2,0	1,8	2,7

На рисунках 4 а и б можно увидеть что семена, облученные по 100 секунд и Контрольный вариант, не сильно отличаются друг от друга, как те семена, время воздействия на которые составило 20 и 30 минут.

Результаты биометрического анализа (см. таблицу 2) у растений яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Экада 70 показали, что семена, облученные по 100 секунд, имеют большую высоту растений (рис.5), общую и продуктивную кустистость (рис. 6), количество междоузлий (шт.), чем контроль и время воздействия 20 и 30 минут.

На основании, приведенных выше данных, можно сделать следующий вывод, что наивысшее значение высоты растений преимущественно в варианте со временем воздействия облучения на семенной материал в течение 100 секунд - что составило 90 см, а продуктивная кустистость при этом составляет 2,8.

Наименьшая высота растений в варианте с облучением семенного материала в течение 30 минут – 71 с, а продуктивная кустистость составила 1,8.

Показатели общей кустистости и среднего числа нормально развитых стеблей, дающих зерно на одно растение также были наилучшими в варианте с воздействием облучения семенного материала в течении 100 секунд, худшими в варианте в 30 минут.

Отсюда можно сделать вывод о том, что гиперзвуковое облучение влияет на биометрические показатели яровой мягкой пшеницы, на массу семян и урожайность. При этом большое значение имеет время воздействия данного облучения.

**Расчетная модель.**

В данной работе методом молекулярной динамики показано, что распространение гиперзвуковой волны вдоль границы раздела вода-стекло, содержащей ионы натрия, происходит дальше, чем в водной среде.

Поскольку в данной работе проверялась волноводная модель кластеров  $Na^+-[H_2O]_n$ , было проведено молекулярно-динамическое моделирование с использованием кода LAMMPS [7]. Для построения модели использовался код atomsk [8], ovito [9], последний применялся также для визуализации результатов моделирования.

Модель волноводной цепочки кластеров  $Na^+-[H_2O]_n$  создана с использованием потенциалов взаимодействия ReaxFF [10]. Геометрия модели представляла собой параллелепипед размерами 3.3 нм × 3.3 нм × 132 нм, состоящий из молекул воды, помещенных в периодические граничные условия Борна-Кармана по всем трем измерениям. В первом случае параллелепипед содержал расположенные с периодом 3,3 нм ионы  $Na^+$ , во втором, только молекулы воды. Система приводилась в начальное состояние из твердой фазы льда с гексагональной упаковкой [11] путем плавления до жидкой фазы с температурой 300 К. После подготовки происходил расчет распространения гиперзвуковой акустической волны при помощи отклонения центра масс слоя (толщиной 1,8 нм) молекул воды от положения равновесия по закону.

$$f(t) = 0.01nm \cdot \sin(2\pi / 10^{-13} Hz \cdot t) \tag{1}$$

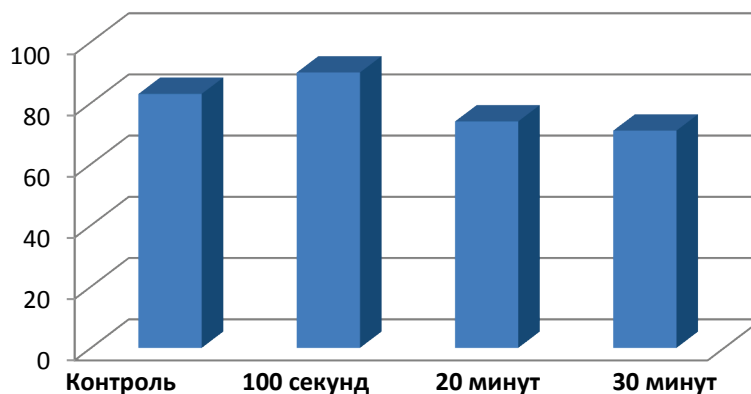
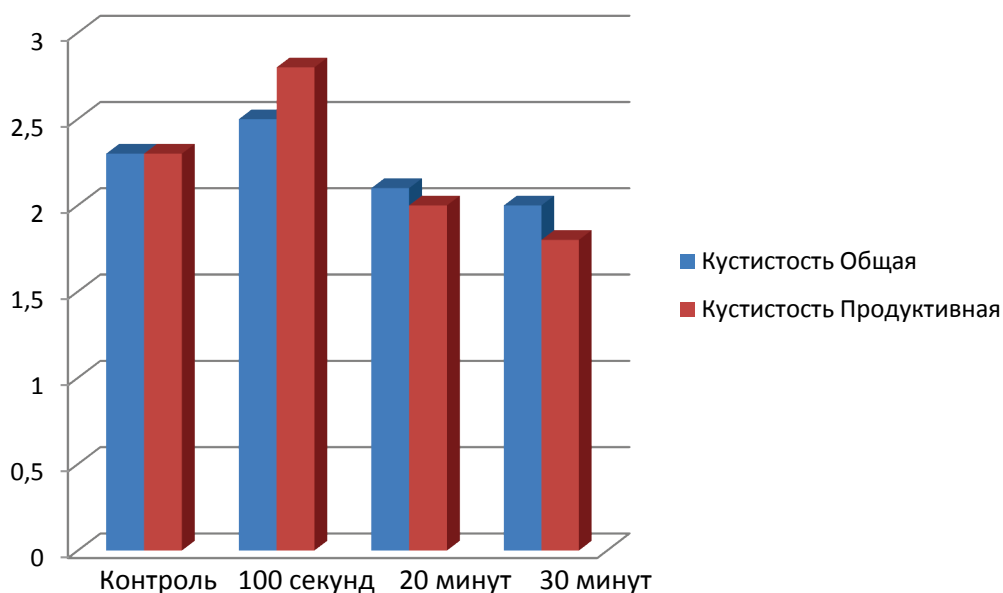


Рисунок 5. Средняя высота растений (см)



**Рисунок 6.** Биометрические показатели общей и продуктивной кустистости в зависимости от времени воздействия облучения на семенной материал

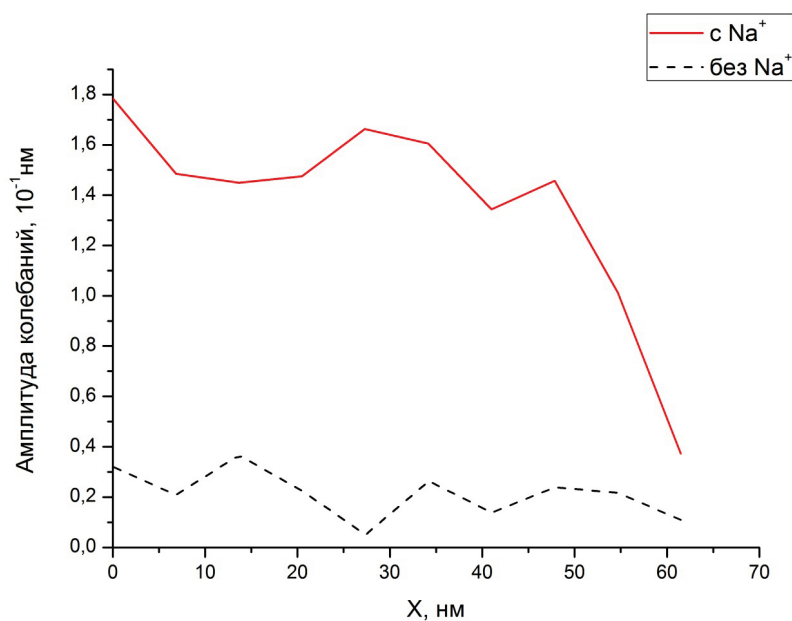
### Результаты расчетов.

Результаты моделирования распространения гиперзвуковой акустической волны использованы для построения графика зависимости амплитуды отклонения слоев молекул воды толщиной 1,8 нм от положения равновесия. На графике зависимости амплитуды отклонения от расстояния до источника (рис. 7) видно, что начиная с 10 нм амплитуда волны в системе, содержащей ионы  $\text{Na}^+$  выходит на плато и оказывается в 5 раз выше, чем в системе, не содержащей ионов  $\text{Na}^+$ . Данный результат свидетельствует о том, что цепочка кластеров, созданных ионами  $\text{Na}^+$ , способствует лучшему распространению волны и меньшему затуханию.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании, приведенных выше данных, можно сделать следующий вывод, что наивысшее значение высоты растений преимущественно в варианте со временем воздействия облучения на семенной материал в течение 100 секунд - что составило 90 см, а продуктивная кустистость при этом составляет 2,8.

Наименьшая высота растений в варианте с облучением семенного материала в течение 30 минут – 71 см, а продуктивная кустистость составила 1,8.



**Рисунок 7.** Зависимость величины смещения кластера от расстояния до гиперзвукового источника

Показатели общей кустистости и среднего числа нормально развитых стеблей, дающих зерно на одно растение также были наилучшими в варианте с воздействием облучения семенного материала в течении 100 секунд, худшими в варианте в 30 минут.

Отсюда можно сделать вывод о том, что гиперзвуковое облучение влияет на биометрические показатели яровой мягкой пшеницы, на массу семян и урожайность. При этом большое значение имеет время воздействия данного облучения.

Полученные в результате моделирования данные показывают, что граница раздела двух сред вода-стекло является каналом передачи энергии от источника гиперзвуковых волн до биологического объекта.

*Исследование выполнено при поддержке Суперкомпьютерного центра МГУ [12].*

#### **Список литературы / References:**

1. Бецкий О.В., Кислов В.В., Лебедев Н.Н. *Миллиметровые волны и живые системы*. М.: Сайнс-пресс, 2004, 272 с. [Betsky O.V., Kislov V.V., Lebedev N.N. *Millimeter waves and living systems*. M.: Science-press, 2004, 272 p. (In Russ.)].
2. Тетельбаум Д.И., Курильчик Е.В., Менделева Ю.А. Эффект дальнего действия при малоинтенсивном облучении твердых тел. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* 2009, вып. 3, с. 94-103 [Tetelbaum D.I., Kurilchik E.V., Mendeleva Yu.A. Effect of long-range action at low-intensity irradiation of solids. *Surface. X-Ray, Synchrotron and Neutron Research*, 2009, no. 3, pp. 94-103 (In Russ.)].
3. Тетельбаум Д.И., Туловчиков В.С., Менделева Ю.А., Курильчик Е.В., Никольская А.А., Степанов А.В. Роль границы раздела водная среда-твердое тело в передаче возбуждения кремния светом. *Журнал технической физики*, 2019, вып. 89, № 9, с. 1427-1433 [Tetelbaum D.I., Tulovchikov V.S., Mendeleva Yu.A., Kurilchik E.V., Nikolskaya A.A., Stepanov A.V. The role of the water-solid interface in the transfer of excitation of silicon by light. *Journal of Technical Physics*, 2019, vol. 89, no. 9, pp. 1427-1433 (In Russ.)].
4. Левшунова В.Л., Похил Г.П., Тетельбаум Д.И. Автоколебания распределенных зарядов в естественном оксиде на поверхности кремния как источник возбуждения процессов, ответственных за эффект дальнего действия. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2011, вып. 3, с. 1-4 [Levshunova V.L., Pokhil G.P., Tetelbaum D.I. Self-oscillations of distributed charges in natural oxide on the silicon surface as a source of excitation of processes responsible for the long-range effect. *Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies*, 2011, no. 3, pp. 1-4 (In Russ.)].
5. Степанов А.В., Тетельбаум Д.И. Молекулярно-динамическое моделирование проникновения в кремний гиперзвуковых волн, генерируемых в естественном оксиде кремния при облучении. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2017, вып. 7, с. 82-88 [Stepanov A.V., Tetelbaum D.I. Molecular dynamics simulation of penetration into silicon of hypersonic waves generated in natural silicon oxide during irradiation. *Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies*, 2017, no. 7, pp. 82-88 (In Russ.)].
6. ГОСТ 12038-84. *Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести* [GOST 12038-84. *Seeds of agricultural crops. Germination methods* (In Russ.)].
7. Plimpton S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics. *Journal of Computational Physics*, 1995, vol. 117, no. 1, pp. 1-19.
8. Pierre Hirel. Atomsk: A tool for manipulating and converting atomic data files. *Comput. Phys. Comm.*, 2015, vol. 197, pp. 212-219, doi: 10.1016/j.cpc.2015.07.012.
9. Stukowski A. Modelling Simul. *Mater. Sci. Eng.*, 2010, vol. 18, p. 015012.
10. Monti S., Corozzi A., Fristrup P., Joshi K.L., Shin Y.K., Oelschlaeger P., van Duin A.C.T., Barone V. Exploring the conformational and reactive dynamics of biomolecules in solution using an extended version of the glycine reactive force field. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2013, vol. 15, no. 36, pp. 15062-15077.
11. Hirsch T.K., Ojamae L. Quantum-Chemical and Force-Field Investigations of Ice Ih: Computation of Proton-Ordered Structures and Prediction of Their Lattice Energies. *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 108, 2004, pp. 15856-15864.
12. Воеводин В.В., Жуматий С.А., Соболев С.И., Антонов А.С., Брызгалов П.А., Никитенко Д.А., Стефанов К.С., Воеводин В.В. Практика «Ломоносова» Суперкомпьютер. *Открытые системы Ж*, Москва: Открытые системы, 2012, № 7, с. 36-39 [Voevodin V.V., Zhumaty S.A., Sobolev S.I., Antonov A.S., Bryzgalov P.A., Nikitenko D.A., Stefanov K.S., Voevodin V.V. Practice "Lomonosov" Supercomputer. *Open Systems Zh*, Moscow: Open Systems, 2012, no. 7, pp. 36-39 (In Russ.)].

**GENERATION OF HYPERSONIC WAVES UPON IRRADIATION OF SILICON WITH LIGHT, THEIR PROPAGATION AND INFLUENCE ON LIVING ORGANISMS: COMPUTER SIMULATION AND EXPERIMENT**

Stepanov A.V.<sup>1</sup>, Popov A.P.<sup>1</sup>, Kovalenko A.V.<sup>1</sup>, Yumanov D.S.<sup>1</sup>, Dimitrieva A.I.<sup>1</sup>, Sergeeva K.V.<sup>1</sup>,  
Dementiev D.A.<sup>1</sup>, Nikolskaya A.A.<sup>2</sup>, Tulovchikov V.S.<sup>2</sup>, Tetelbaum D.I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Chuvash State Agrarian University

K. Marx str., 29, Cheboksary, 428003, Russia; e-mail: for.anton\_step@mail.ru

<sup>2</sup>Lobachevskiy Nizhniy Novgorod State University,

23 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603022, Russian Federation; e-mail: tetelbaum@phys.unn.ru

Received 26.08.2023. DOI: 10.29039/rusjbp.2023.0644

**Abstract.** This paper presents a molecular dynamics simulation of hypersonic wave propagation in liquid–solid systems such as aqueous solutions of NaCl and glass (containing Na ions); the role of waveguide properties of Na<sup>+</sup>–(H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>-type clusters is analyzed; the role of Na<sup>+</sup>–(H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>-type clusters in the propagation of hypersonic waves is discussed. The interaction between hypersound and cellular organelles was studied numerically and compared with biological experiments on seeds of spring soft wheat variety Ekada 70, in particular on the effect of this effect on their growth. hypersonic irradiation affects the biometric parameters of spring soft wheat, seed weight and yield. In this case, the time of exposure to this irradiation is of great importance. The smallest plant height in the variant with seed irradiation for 30 minutes was 71 s, and the productive bushiness was 1.8. The indices of general bushiness and the average number of normally developed stems producing grain per plant were also the best in the variant with exposure to seed material irradiation for 100 seconds, the worst in the variant of 30 minutes. From this we can conclude that hypersonic irradiation affects the biometric parameters of spring soft wheat, seed weight and yield. In this case, the time of exposure to this irradiation is of great importance. The data obtained as a result of modeling show that the water-glass interface is a channel for energy transfer from a source of hypersonic waves to a biological object.

**Key words:** long-range effect, hypersound, long-range biological effect.