

2. **Voronova Inna Vasilievna**, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of General and Private Animal Science, Chuvash State Agrarian University, 428003, Chuvash Republic, Cheboksary, st. K. Marx, d. 29; e-mail: voinn1978@mail.ru, tel. 8-905-199-01-31;

3. **Toboev Gerald Marksovich**, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Veterinary Medicine and Animal Science, Chuvash State Agrarian University, 428003, Chuvash Republic, Cheboksary, st. K. Marx, d. 29; e-mail: tgeorg1931@mail.ru, tel. 8-905-197-74-23.

УДК 57.043

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РЕГЕНЕРАТИВНЫЕ ФУНКЦИИ ПЛАНАРИЙ ПРИ ФИЗИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А. В. Степанов¹, Д. И. Тетельбаум², А. И. Дмитриева¹, А. В. Константинова¹, Д. С. Юманов¹,
А. П. Попов¹, А. В. Коваленко¹

¹Чувашский государственный аграрный университет
428003, г. Чебоксары, Российская Федерация

²Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния гиперзвуковых волн, возбуждаемых гетероструктурой (кремниевой пластиной с естественным оксидом) на выживаемость планарий после их декапитации. Целью работы было изучение физических и биологических факторов, влияющих на регенерацию планарий. Основным объектом исследования был модельный организм – планария *Dugesia Tigrina*. Эксперимент состоял в том, что проводилась декапитация планарий при помощи стерильного скальпеля. Было выделено 2 группы (контрольная и опытная) по 10 планарий в каждой. Выбирались планарии с длиной туловища около 10 мм. Декапитация проводилась так: отсекалась верхняя часть головы выше линии глаз планарий. В опытной группе сразу после декапитации проводилось облучение планарий гиперзвуком с помощью установки. Планарии были обезглавлены, а затем в течение недели находились под наблюдением в их среде обитания. Происходила идентификация и подсчет микроорганизмов, посев бактериальной микрофлоры, контроль температуры и рН. Для объяснения механизмов, возникающих под действием гиперзвука, была разработана математическая модель прохождения гиперзвуковых волн через тонкий слой воды вблизи границы раздела стекло-жидкость. После декапитации опытной группы было обнаружено, что в опытной группе, подвергшейся воздействию гиперзвука, в процессе регенерации выживаемость планарий была на 60 % выше, чем в контрольном варианте. Было доказано, что в водной среде вдоль границы раздела стекло-вода гиперзвуковое распространение происходит с меньшим затуханием, чем в водяном столбе. Это приводит к волноводному эффекту и улучшенной передаче гиперзвуковых эффектов исследуемым организмам.

Ключевые слова: регенерация, планарии, гиперзвук, молекулярная динамика, эффект дальнего действия.

Введение. Новые эксперименты по установлению влияния миллиметровых электромагнитных и акустических волн на живые системы и их ткани доказывают важность использования миллиметровых волн [1] в качестве биопрепаратов в ветеринарной медицине [3], [5]. В этом случае создание и распространение этих волн сопровождается акустическими колебаниями и гиперзвуковыми волнами, которые являются агентами указанного влияния. Открытым остается вопрос о механизме, обеспечивающем установленную аномально большую глубину проникновения в зону влияния облучения. Ранее было установлено явление (эффект дальнего действия, ЭД [4], [6]), способное прояснить данный механизм: при облучении светом твердого тела (на примере кремния), находящегося в контакте с системой, содержащей водный раствор NaCl (от 0,1 до 7 %), происходит изменение свойств другого образца, расположенного на расстоянии нескольких сантиметров от облученного. Согласно предложенной модели, ЭД обусловлен генерацией облучаемым образцом гиперзвуковых волн, а их распространение на большие расстояния в указанной системе связано с волноводными свойствами границы раздела раствора с твердым телом. Представленные сведения имеют особое значение в связи с тем, что ионы щелочных металлов в живых организмах участвуют в большинстве биологических процессов.

В данной работе ЭД исследуется в отношении живых систем, планарий (из подотряда Tricladida).

Планарии обладают уникальной регенеративной способностью, поэтому особенно интересны для исследования. Так, у человека за процессы регенерации тканей в случае повреждения ответственны региональные стволовые клетки. В тканях организма данные стволовые клетки представлены в малых количествах, что делает их изучение *in vivo* сложной процедурой. Зрелые стволовые клетки планарий (необласты) имеются в количестве до 30 % от общего количества клеток [6], [7], [13]. Консервативная часть генома стволовых клеток человека гомологична (около 90 %) соответствующим генам планарий [9], [17]. Некоторые виды планарий (например, *Dendrocoelum lacteum*) неспособны восстанавливать утраченные части

тела по аналогии с высшими животными, новое включение единственного гена (Dlax- β -катенин-1) воссоздаёт возможность регенерации тканей, не свойственную этому виду организмов [16]. Интересно воздействие физических факторов на регенеративную способность планарий. Так, в научных работах [2] было доказано, что слабое магнитное поле может в ряде случаев как ускорять, так и замедлять процесс регенерации планарий.

Цель данной работы – исследовать воздействие биологических факторов и гиперзвука на способность планарий к регенерации.

Для решения цели были поставлены следующие задачи:

1. На модельном организме – планария вида *Dugesia Tigrina* – провести серию опытов с облучением объекта гиперзвуком.

2. Исследование изменения роста декапитированных планарий, а также контроль за состоянием биофизических параметров среды их обитания.

3. Создание математической модели процесса распространения гиперзвуковых волн на интерфейсе твердое тело – жидкость.

Материалы и методы исследований. Эксперимент по влиянию гиперзвукового воздействия проводился на модельном организме – планариях вида *Dugesia Tigrina* [8]. Ранее на планариях этого вида уже проводились эксперименты по изучению влияний электромагнитного поля на процесс регенерации [2]. Планарии в процессе настоящего эксперимента содержались в пластиковом контейнере из полипропилена. Вариация температуры окружающей среды – 19-22° С в сутки, а длительность светового периода – 15-25 минут. Планарии располагались в темном помещении и извлекались на свет во время ежедневных замеров. Поскольку планарии чувствительны к составу воды [8], для их разведения использовалась вода из места происхождения планарий. В течение эксперимента состав микроорганизмов в среде содержания планарий менялся.

Эксперимент состоял в декапитации планарий при помощи стерильного скальпеля. Было выделено 2 группы (контрольная и опытная) по 10 планарий в каждой. Выбирались планарии с длиной туловища около 10 мм. Декапитация проводилась так: отсекалась верхняя часть головы выше линии глаз планарий. В опытной группе сразу после декапитации проводилось облучение планарий гиперзвуком с помощью установки, предложенной в статье [6]. Схема эксперимента по облучению представлена на рис. 1. В качестве источника использовалась пластина кремния марки КДБ-1 со слоем естественного оксида на поверхности. Пластина кремния освещалась светом от светодиодного осветителя мощностью в 10 Вт и цветовой температурой (6000 К) с расстояния 7 см. Ранее в научной работе [6] было предложено следующее: гиперзвуковую волну необходимо распространять вдоль границы раздела твердое тело – жидкость при наличии в воде кластеров ионов Na^+ . Так, в стеклянной чашке Петри на границе раздела стекло – вода содержатся ионы Na^+ . По этой причине кремний располагался на поверхности стекла, причем между стеклом и кремнием оставалась тонкая прослойка воды. Чтобы не допустить попадание света на планарий в процессе облучения кремния, в чашку Петри с ними вместе помещался кремний, сверху планарии с кремнием накрывались стеклянной крышкой дном вниз, и все, кроме кремния, закрывалось сверху черной бумагой. Облучение кремния проводилось в течение 100 с. Данное время было выбрано потому, что оно являлось оптимальным [4], [6] с точки зрения величины изменений свойств кремния. После облучения опытная и контрольная группы были отправлены в термостат на 24 часа, температура воздуха в термостате поддерживалась на уровне $26^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}$.

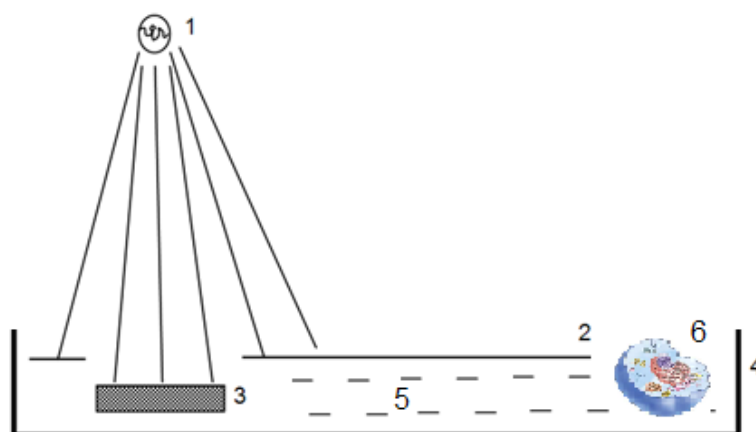


Рис. 1. Схема эксперимента для исследования биологического эффекта дальнего действия:
1 – светодиодный осветитель, 2 – экран, 3 – кремниевая пластинка, 4 – чашка Петри, 5 – вода, 6 – биологическая клетка

Компьютерное моделирование распространения гиперзвука.

В данной работе с помощью метода молекулярной динамики было доказано, 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 $\text{Na}^+ \cdot [\text{H}_2\text{O}]_n$, было проведено молекулярно-динамическое моделирование с использованием кода LAMMPS [14]. Для построения модели использовался код atomsk [10], ovito [18], последний применялся также для визуализации результатов моделирования.

Модель волноводной цепочки кластеров $\text{Na}^+ \cdot [\text{H}_2\text{O}]_n$ была создана с использованием потенциалов взаимодействия ReaxFF [10]. Геометрия модели представляла собой параллелепипед размерами $3,3 \text{ нм} \times 3,3 \text{ нм} \times 132 \text{ нм}$, состоящий из молекул воды, помещенных в периодические граничные условия Борна-Кармана по всем трем измерениям. В первом случае параллелепипед содержал расположенные с периодом $3,3 \text{ нм}$ ионы Na^+ , во втором – только молекулы воды. Система приводилась в начальное состояние из твердой фазы льда с гексагональной упаковкой [12], [15] путем плавления до жидкой фазы с температурой в 300 К . После подготовки происходил расчет распространения гиперзвуковой акустической волны при помощи отклонения центра масс слоя (толщиной $1,8 \text{ нм}$) молекул воды от положения равновесия по закону $0,01 \text{ нм} \cdot \sin(2\pi / 10^{-13} \text{ Гц} \cdot t)$.

Результаты исследований и их обсуждение. Эксперимент по влиянию гиперзвуковых волн.

Во время эксперимента совпали несколько условий:

- 1) присутствие нескольких видов микроорганизмов и цист в исходной среде содержания планарий (артезианской воде);
- 2) повышение температуры среды содержания до 26°C (является высокой температурой для открытых водоемов умеренной полосы РФ);
- 3) присутствие в воде значительного количества питательных веществ (межклеточное вещество планарий после декапитации).

Совокупное взаимодействие условий привело к росту микроорганизмов в чашках Петри.

Сокращение числа планарий в течение времени проведения эксперимента привело к необходимости дополнительных микробиологических исследований среды содержания опытной и контрольной групп, а также водной среды из бокса исходного (начального) содержания популяции, далее обозначенных «О», «К» и «Н», соответственно.

В группе «Н» обнаружены представители отряда Amphipoda (предположительно *Nipbargoidesmaeoticus*;) и несколько десятков представителей *Brachionus rubens* (коловратки). В группе «О» содержатся несколько сотен представителей *Colepshirtus* (инфузории отряда простоматидов), несколько десятков представителей *Stylonychia* (инфузория Стилонихия), несколько десятков представителей *Brachionus rubens* (коловратки) и несколько представителей *Cyclopssr* (отряд циклопы). В группе «К» содержатся несколько сотен представителей *Colepshirtus* (инфузории отряда простоматидов), несколько десятков представителей *Stylonychia* (инфузория Стилонихия), несколько десятков представителей *Brachionus rubens* (коловратки) и несколько представителей *Cyclopssr* (отряд циклопы).

Особый интерес представляют *Colepshirtus* (инфузории отряда простоматидов), в основном их рацион состоит из органических остатков других одноклеточных. Колепсы способны атаковать живые, но поврежденные организмы, в том числе и декапитированные части планарий. Для иммобилизации жертвы колепс использует ядовитые органеллы. Колепс впрыскивает яд в свою жертву до ее полной иммобилизации (5-10 мин.). Указанный процесс наблюдался в наших экспериментах по прошествии суток с момента декапитации. В областях рассечений тела планарии под микроскопом отмечены были несколько инфузурий, атакующих рубец. В течение недели наблюдений в контрольной группе полностью погибли все планарии, а в группе О сохранилось больше 60 %. Произошли изменения и в характере поведения планарий. Отметим, что планарии в начале эксперимента локализовались в основном на дне чашки Петри, перемещались с большими скоростями, а через неделю наблюдений после декапитации планарии стали перемещаться по стенкам чашки Петри и по границе раздела вода-воздух, кроме того, снизилась скорость их передвижения.

Компьютерное моделирование распространения гиперзвука.

Результаты моделирования распространения гиперзвуковой акустической волны использованы для построения графика зависимости амплитуды отклонения слоев молекул воды толщиной $1,8 \text{ нм}$ от положения равновесия. На графике зависимости амплитуды отклонения от расстояния до источника (рис. 2) видно, что начиная с 10 нм амплитуда волны в системе, содержащей ионы Na^+ , выходит на плато и оказывается в 5 раз выше, чем в системе, не содержащей ионов Na^+ . Данный результат свидетельствует о том, что цепочка кластеров, созданных ионами Na^+ , способствует лучшему распространению волны и меньшему ее затуханию.

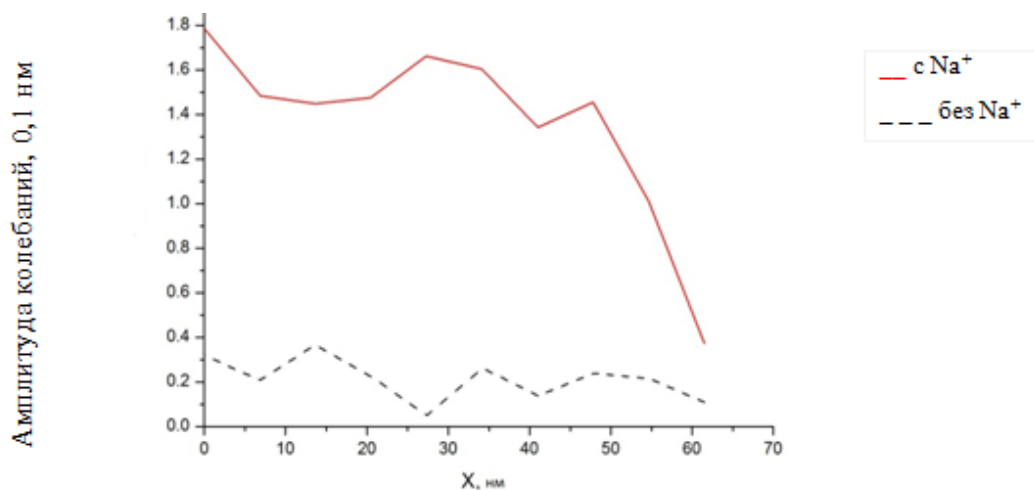


Рис. 2. Зависимость амплитуды колебания кластеров воды от расстояния до источника гиперзвука

Выводы. Воздействие гиперзвука на живые системы в чашке Петри приводит к разнице в числе планарий, выживших в контрольной и опытной группах. Этот феномен является результатом влияния гиперзвука на среды обитания планарий и их организмы.

Список литературы

1. Бецкий О. В. Миллиметровые волны в живых системах / О. В. Бецкий, В. В. Кислов, Н. Н. Лебедев. – Москва: Сайнс-Пресс, 2004. – 272 с.
2. Влияние слабых магнитных полей в разные фазы регенерации планарий / О. Н. Петрова, С. Н. Мякишева, С. С. Попова, К. Б. Асланиди. // Биофизика – 2015. – № 60. – С. 158–163.
3. Иванова, Р. Н. Морфология, биохимические показатели крови, продуктивность и сохранность перепелов при использовании пробиотической добавки к корму «БАЦЕЛЛ» / Р. Н. Иванова, И. А. Алексеев // Российский журнал Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. – 2012. № 1 (7). – С. 168-172.
4. Левшунова, В. Л. Автоколебания распределенных зарядов в естественном оксиде на поверхности кремния как источник возбуждения процессов, ответственных за эффект дальнего действия / В. Л. Левшунова, Г. П. Похил, Д. И. Тетельбаум // Поверхность. Рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования. – 2011. – № 3 – С.1 - 4.
5. Опыт выращивания телят с применением пробиотика споробактерина / Тирас Х. П, И. А. Алексеев, А. М. Волков, Р. Н. Иванова // Аграрный вестник Урала. – 2015. – № 2 (132). – С. 12-15.
6. Роль границы раздела водная среда-твердое тело в передаче возбуждения кремния светом / Д. И. Тетельбаум, В. С. Туловчиков, Ю. А. Менделева, Е. В. Курильчик [и др.] // Журнал технической физики. – 2019. – № 89. – С.1427.
7. Тетельбаум, Д. И. Эффект дальнего действия при малоинтенсивном облучении твердых тел / Д. И. Тетельбаум, Е. В. Курильчик, Ю. А. Менделева // Поверхность. Рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования. – 2009. – № 3 – С. 94-103.
8. Тирас, Х. П. Регламентация условий культивирования планарий и параметров морфометрического эксперимента / Х. П. Тирас, К. Б. Асланиди // Современные проблемы науки и образования. – 2016. – № 6. – С. 515.
9. A comparative transcriptomic analysis reveals conserved features of stem cell pluripotency in planarians and mammals / R. M. Labbé, M. Irimia, K. W. Currie, A. Lin [et al.] // Stem Cells. – 2012. – N 30. – P. 1734.
10. Exploring the conformational and reactive dynamics of biomolecules in solution using an extended version of the glycine reactive force field Physical Chemistry Chemical Physics / S. Monti, A. Corozzi, P. Fristrup, K. L. Joshi [et al.]. – 2013. – N15. – P. 15062.
11. Hirel, P. Atomsk: a tool for manipulating and converting atomic data files / P. Hirel // Computer Physics Communication. – 2015. – N 197. – P. 212.
12. Hirsch, T. K. Quantum-Chemical and Force-Field Investigations of Ice Ih: Computation of Proton-Ordered Structures and Prediction of Their Lattice Energies / T. K. Hirsch, L. Ojamäe // The Journal of Physical Chemistry B – 2004. – N 108 – P. 15856.
13. Planarians: an in vivo model for Regenerative Medicine Int. J. Stem Cells. / A. Karami, H. Tebyanian, V. Goodarzi, S. Shiri. – 2015. – N 8. – P. 128-133.
14. Plimpton, S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics Journal of Computational Physics / S. Plimpton. – 1995. – N 117 – P. 1.
15. Practice of «Lomonosov» / V. V. Voevodin, S. A. Zhumatiy, S. I. Sobolev, A. S. Antonov [et al.] // Supercomputer Open Systems J. – 2012. – N 7. – P. 349–352.

16. Reactivating head regrowth in a regeneration-deficient planarian species / Liu, S. Y, C. Selck, B. Friedrich, R. Lutz [et al.] // Nature. – 2013. – N 500. – P. 81.
17. The Schmidte amediterranea database as a molecular resource for studying platyhelminthes, stemcells and regeneration / A. Sánchez, A. Lvarado, P. A. Newmark, S. M. Robb [et al.] // Development. – 2002. – N129 – P. 5659.
18. Stukowski, A. Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. / A. Stukowski – 2010. – N18 – P. 015012.

Сведения об авторах

1. **Степанов Антон Викторович**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики, физики и информационных технологий, Чувашский государственный аграрный университет, 428003, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, д. 29; e-mail: for.antonstep@gmail.com, тел.: 89050284331;
2. **Тетельбаум Давид Исаакович**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского физико-технического института ННГУ им. Н. И. Лобачевского, Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 603022, г. Нижний Новгород, проспект Гагарина, 23; e-mail: tetelbaum@phys.unn.ru, тел.: 89601711942;
3. **Димитриева Анастасия Ивановна**, кандидат ветеринарных наук Чувашский государственный аграрный университет, 428003, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, д. 29; e-mail: nastena_dim@mail.ru, тел.: 8927 8447080;
4. **Константинова Анна Владимировна**, студент, Чувашский государственный аграрный университет, 428003, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, д. 29; e-mail: nastena_dim@mail.ru, тел.: 89196631851;
5. **Юманов Дмитрий Сергеевич**, студент, Чувашский государственный аграрный университет, 428003, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, д. 29; e-mail: dima_yu1997@mail.ru, тел.: 89871238328;
6. **Попов Александр Петрович**, студент, Чувашский государственный аграрный университет, 428003, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, д. 29; e-mail: popovaleksandr.petrovich@yandex.ru, тел.: 8959993391;
7. **Коваленко Алёна Витальевна**, студент, Чувашский государственный аграрный университет, 428003, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, д. 29; e-mail: kovalenkoa15051998@gmail.com, тел.: 89876613530.

RESEARCH OF FACTORS AFFECTING REGENERATIVE FUNCTIONS OF PLANARIA UNDER PHYSICAL IMPACT

A.V. Stepanov¹, D.I. Tetelbaum², A.I. Dimitrieva¹, A.V. Konstantinova¹, D.S. Yumanov¹, A.P. Popov¹,
A.V. Kovalenko¹

¹Chuvash State Agrarian University
428003, Cheboksary, Russian Federation

²Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky
603022, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Brief abstract. This paper presents the results of experimental studies of the influence of hypersonic waves excited by a heterostructure (silicon wafer with natural oxide) on the survival rate of planarians after their decapitation. The aim of the work was to study the physical and biological factors affecting the regeneration of planaria. The main object of the study was a model organism, the planarian *Dugesia Tigrina*. The experiment consisted in decapitation of planarians using a sterile scalpel. Was allocated 2 groups (control and experimental), 10 planarians in each. Planaria with a body length of about 10 mm were selected. The decapitation was carried out as follows: the upper part of the head was cut off above the line of the eyes of the planarians. In the experimental group, immediately after decapitation, planarians were irradiated with hypersound using a device. Planaria were decapitated and then monitored for a week in their habitat. Identification and counting of microorganisms, sowing of bacterial microflora, temperature and pH control took place. To explain the mechanisms that arise under the action of hypersound, a mathematical model was developed for the passage of hypersonic waves through a thin layer of water near the glass-liquid interface. After decapitation of the experimental group, it was found that in the experimental group exposed to hypersound, the planarian survival rate during regeneration was 60% higher than in the control variant. It was proved that hypersonic propagation in an aqueous medium along the glass-water interface occurs with less attenuation than in a water column. This leads to a waveguide effect and improved transmission of hypersonic effects to the studied organisms.

Key words: regeneration, planaria, hypersound, molecular dynamics, long-range effect.

References

1. Beckij O. V. Millimetrovye volny v zhivyh sistemah / O. V. Beckij, V. V. Kislov, N. N. Lebedev. – Moskva: Sajns-Press, 2004. – 272 s.

2. Vliyanie slabyx magnitnyx polej v paznye fazy pegenepacii planapij / O. N. Petpova, C. N. Myakisheva, C. C. Popova, K. B. Aclanidi. // Biofizika – 2015. – № 60. – S. 158–163.
3. Ivanova, R. N. Morfologiya, biokhimicheskie pokazateli krovi, produktivnost' i sohrannost' perepelov pri ispol'zovanii probioticheskoj dobavki k kormu «BACELL» / R. N. Ivanova, I. A. Alekseev // Rossijskij zhurnal Problemy veterinarnoj sanitarii, gigieny i ekologii. – 2012. № 1 (7). – S. 168-172.
4. Levshunova, V. L. Avtokolebaniya raspredelennyh zaryadov v estestvennom okside na poverhnosti kremniya kak istochnik vozbuzhdeniya processov, otvetstvennyh za effekt dal'nodejstviya / V. L. Levshunova, G. P. Pohil, D. I. Tetel'baum // Poverhnost'. Rentgenovskie sinhrotronnye i nejtronnye issledovaniya. – 2011. – № 3 – S.1 - 4.
5. Opyt vyrashchivaniya telyat s primeneniem probiotika sporobakterina / Tiras H. P, I. A. Alekseev, A. M. Volkov, R. N. Ivanova // Agrarnyj vestnik Urala. – 2015. – № 2 (132). – S. 12-15.
6. Rol' granicy razdela vodnaya sreda-tverdoe telo v peredache vozbuzhdeniya kremniya svetom / D. I. Tetel'baum, V. S. Tulovchikov, YU. A. Mendeleva, E. V. Kuril'chik [i dr.] // ZHurnal tekhnicheskoy fiziki. – 2019. – № 89. – S.1427.
7. Tetel'baum, D. I. Effekt dal'nodejstviya pri malointensivnom obluchenii tverdyh tel / D. I. Tetel'baum, E. V. Kuril'chik, YU. A. Mendeleva // Poverhnost'. Rentgenovskie sinhrotronnye i nejtronnye issledovaniya. – 2009. – № 3 – S. 94-103.
8. Tiras, H. P. Reglamentaciya uslovij kul'tivirovaniya planarij i parametrov morfometricheskogo eksperimenta / H. P. Tiras, K. B. Aslanidi // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2016. – № 6. – S. 515.
9. A comparative transcriptomic analysis reveals conserved features of stem cell pluripotency in planarians and mammals / R. M. Labbé, M. Irimia, K. W. Currie, A. Lin [et al.] // Stem Cells. – 2012. – N 30. – P. 1734.
10. Exploring the conformational and reactive dynamics of biomolecules in solution using an extended version of the glycine reactive force field Physical Chemistry Chemical Physics / S. Monti, A. Corozzi, P. Fristrup, K. L. Joshi [et al.]. – 2013. – N15. – P. 15062.
11. Hirel, P. Atomsk: a tool for manipulating and converting atomic data files / P. Hirel // Computer Physics Communication. – 2015. – N 197. – P. 212.
12. Hirsch, T. K. Quantum-Chemical and Force-Field Investigations of Ice Ih: Computation of Proton-Ordered Structures and Prediction of Their Lattice Energies / T. K. Hirsch, L. Ojamäe // The Journal of Physical Chemistry B – 2004. – N 108 – P. 15856.
13. Planarians: an in vivo model for Regenerative Medicine Int. J. Stem Cells. / A. Karami, H. Tebyanian, V. Goodarzi, S. Shiri. – 2015. – N 8. – P. 128-133.
14. Plimpton, S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics Journal of Computational Physics / S. Plimpton. – 1995. – N 117 – P. 1.
15. Practice of «Lomonosov» / Vl. V. Voevodin, S. A. Zhumatiy, S. I. Sobolev, A. S. Antonov [et al.] // Supercomputer Open Systems J. – 2012. – N 7. – P. 349–352.
16. Reactivating head regrowth in a regeneration-deficient planarian species / Liu, S. Y, C. Selck, B. Friedrich, R. Lutz [et al.]// Nature. – 2013. – N 500. – P. 81.
17. The Schmidte amediterranea database as a molecular resource for studying platyhelminthes, stemcells and regeneration / A. Sánchez, A. Lvarado, P. A. Newmark, S. M. Robb [et al.] // Development. – 2002. – N129 – P. 5659.
18. Stukowski, A. Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. / A. Stukowski – 2010. – N18 – P. 015012.

Information about authors

1. **Stepanov Anton Viktorovich**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics, Physics and Information Technologies, Chuvash State Agrarian University, 428003, Cheboksary, st. K. Marx, 29; e-mail: for.antonstep@gmail.com, tel.: 89050284331;
2. **Tetelbaum David Isaakovich**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher of the Scientific Research Institute of Physics and Technology of the NNSU named after N.I. Lobachevsky, Nizhny Novgorod State University named after N.I. NI Lobachevsky, 603022, Nizhny Novgorod, Gagarin Avenue, 23; e-mail: tetelbaum@phys.unn.ru, tel.: 89601711942;
3. **Dimitrieva Anastasia Ivanovna**, Candidate of Veterinary Sciences Chuvash State Agrarian University, 428003, Cheboksary, st. K. Marx, 29; e-mail: nastena_dim@mail.ru, tel.: 8927 8447080;
4. **Konstantinova Anna Vladimirovna**, student, Chuvash State Agrarian University, 428003, Cheboksary, st. K. Marx, 29; e-mail: nastena_dim@mail.ru, tel.: 89196631851;
5. **Yumanov Dmitry Sergeevich**, student, Chuvash State Agrarian University, 428003, Cheboksary, st. K. Marx, 29; e-mail: dima_yu1997@mail.ru, tel.: 89871238328;
6. **Popov Alexander Petrovich**, student, Chuvash State Agrarian University, 428003, Cheboksary, st. K. Marx, 29; e-mail: popovaleksandr.petrovich@yandex.ru, tel.: 8959993391;
7. **Kovalenko Alena Vitalievna**, student, Chuvash State Agrarian University, 428003, Cheboksary, st. K. Marx, 29; e-mail: kovalenkoa15051998@gmail.com, tel: 89876613530.