

K. E. Abbakumov, A. V. Vagin  
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

## WAVE PROCESSES IN A FINE-LAYERED MEDIUM

*The problem of the propagation of elastic waves in a fine-layered steel-graphite medium is considered. The propagation of a longitudinal wave in a finely layered medium with homogeneous boundary conditions parallel to layers of different thickness is investigated. A new dispersion equation with previously unrecorded corrections for determining the propagation velocity of a longitudinal wave in a finely layered medium is derived and solved with respect to the wave number. The obtained equation is used with reference to the problems of finding the basic physic-mechanical characteristics of the medium. An expression is obtained for the velocity of a longitudinal wave in a finely layered medium by replacing trigonometric functions by their arguments. Analyzed and compared with the results obtained earlier in journal articles and monographs are graphical dependences of the effective velocities of compression waves on the relative thickness of the layers. Calculations were carried out for a total thickness of the steel-graphite layer equal to 1 mm at an ultrasound frequency of 1 MHz.*

**Dispersion equation, elastic waves, wave number, fine-layered medium, propagation speed**

УДК 546.3

И. С. Захаров, Л. В. Контрош, А. В. Храмов, О. И. Шумилов  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## К вопросу об экологической опасности редкоземельных металлов

*Рассматривается актуальная проблема применения редкоземельных металлов (РЗМ) и возможная их опасность для здоровья человека. Приведены основные недостатки современных методов исследования токсичности РЗМ. Особое внимание уделено возможности применения биотестирования для определения токсичности редкоземельных металлов. Рассмотрен метод биотестирования на основе гальванотаксиса, использующий многократное воздействие на тест-организмы, представляющие собой симбиоз *Paramecium bursaria* и зеленых водорослей *Chlorella*. Этот метод является эффективным для исследования токсичности РЗМ, так как влияние их токсичности на *Paramecium bursaria* имеет не только летальный эффект, но также *Paramecium bursaria* сообщает о присутствии РЗМ снижением электрически принудительной подвижности. Настоящее исследование предназначалось для проверки применимы ли *Paramecium bursaria* в разработке биосенсора на основе регистрируемой реакции для обнаружения определенной концентрации РЗМ.*

**Редкоземельные металлы, спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой, атомно-эмиссионная спектроскопия, нейтронно-активационный анализ, биотестирование, гальванотаксис, *Paramecium bursaria*, биосенсор**

К редкоземельным металлам (РЗМ) относят элементы скандий, иттрий, лантан и 14 химических элементов, следующих за лантаном, называемых лантаноидами. Название «редкоземельные» дано в связи с тем, что они, во-первых, сравнительно редко встречаются в земной коре (массовая доля  $(1.6...1.7) \cdot 10^{-2} \%$ ) и, во-вторых, образуют тугоплавкие, практически не растворимые в воде оксиды, которые в начале XIX в. назывались

«землями» [1]. РЗМ встречаются в природе совместно. Они образуют весьма прочные оксиды, галоидные соединения, сульфиды. В природе РЗМ встречаются в нескольких минералах, таких как бастнезит и монацит, в основном они используются для промышленного производства [2]. Уже сегодня РЗМ являются частью многих повседневных устройств, таких как зажигалки, телевизоры и компьютеры. Кроме того, они нахо-

дятся в медицинской технике, ядерной технике, автомобилестроении, военных устройствах, в космических аппаратах. Редкоземельные металлы все чаще используются при производстве сверхпроводников, сверхпроводящих магнитов, кристаллических фосфорных материалов, лазеров, перезаряжаемых гибридных батарей, искусственных алмазов, стекла и керамики. Поскольку РЗМ, особенно гадолиний, основаны на парамагнитных свойствах, они применяются в качестве контрастных веществ в магнитно-резонансной томографии [2]. В клинической диагностике комплексы ионных лантанидов используются в качестве люминесцентных меток.

**Проникновение редкоземельных металлов в окружающую среду.** РЗМ находят все более широкое применение в самых различных технологиях, их добыча растет высокими темпами, что приводит к загрязнению этими элементами окружающей среды и производственной зоны и неизбежно ставит вопросы об экологической и производственной безопасности.

В настоящее время изучается безопасность широкого распространения РЗМ во внешней среде и их возможного накопления в живых организмах [3]–[5].

Большинство редкоземельных металлов относятся к 6-му периоду Периодической системы. Соединения РЗМ подгруппы Y (Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Sc, Y) более токсичны, чем соединения подгруппы Ce (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm); оксиды менее токсичны, чем соли соответствующих металлов.

В естественных условиях РЗМ могут проникать в организм человека только в небольших количествах через подземные воды и атмосферу, однако широкое их использование увеличивает вероятность попадания этих элементов во внутреннюю среду с аэрозолями и пищевыми продуктами [6]. Интерес к РЗМ в биологии связан главным образом с возможностью замены «металлов жизни» (в первую очередь кальция и магния) в живых организмах редкоземельными элементами [7].

**Обзор используемых методов исследования токсичности редкоземельных металлов.** Для исключения неблагоприятных последствий влияния РЗМ на организм контактирующих с ними работников и населения необходимы исследования токсичности этих металлов с использованием современных методов.

Рассмотрев современные методы обнаружения РЗМ, которые наиболее успешно используются в аналитической практике, можно выделить атомно-эмиссионную спектрометрию, масс-спектрометрию с индуктивно связанной плазмой и нейтронно-активационный анализ.

**Масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП МС)** применяется для обнаружения РЗМ наиболее часто, поскольку этот метод чрезвычайно чувствителен и избирателен и позволяет проводить многоэлементный анализ в широком динамическом диапазоне [8].

В ИСП МС источник ИСП используется для получения однозарядных ионов из матриц элементов в пробе, которые затем направляются в масс-спектрометр и разделяются по соотношению массы к заряду. Ионы с определенным отношением массы к заряду направляются на детектор, определяющий их количество (см. рис. 1).

Несмотря на замечательные аналитические характеристики ИСП МС, проблема интерферирующих влияний также присуща этому методу, который требует математической обработки спектра, масс-спектрометров с высоким разрешением и реакционных и коллизионных ячеек, а также требует разделения образцов и предварительной концентрации в случае исследования токсичности РЗМ.

**Атомно-эмиссионная спектроскопия (АЭС)** применяется довольно часто, поскольку позволяет быстро проводить многоэлементный анализ в широком диапазоне содержимого с умеренными абсолютными пределами обнаружения, отличной вос-



Рис. 1

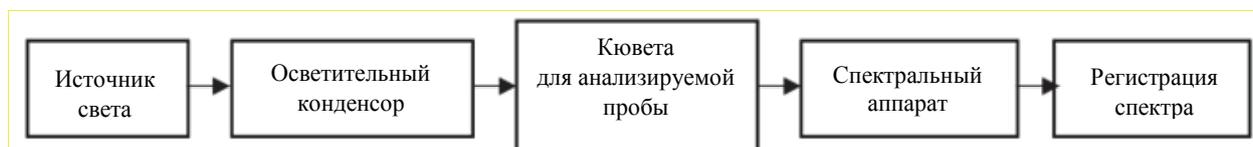


Рис. 2

производимостью и низкими систематическими ошибками. Блок-схема атомно-эмиссионного спектрометра приведена на рис. 2.

АЭС позволяет быстро проводить многоэлементный анализ в широком диапазоне содержания с умеренными абсолютными пределами обнаружения, отличной воспроизводимостью и низкими систематическими ошибками [9]. Но без предварительного концентрирования и разделения исследуемых проб содержание следов РЗМ может быть определено в пределах обнаружения – микрограмм на литр.

**Нейтронно-активационный анализ (НАА)** широко используется для обнаружения РЗМ в геологических образцах и объектах внеземного происхождения, а также в образцах окружающей среды, почвы и воды. Однако НАА неприменим, когда матричные радионуклиды с более высокой радиоактивностью приводят к высокому фону в гамма-спектре [10].

Метод НАА применяется во многих областях исследований. Однако разработка неядерных методов, таких как ИСП МС, привела к отказу от этого метода, особенно при анализе биологических образцов.

Кроме рассмотренных методов, используемых для обнаружения РЗМ, реже используются методы флуоресценции, спектрофотометрии.

Флуоресценция используется, как правило, для определения одного РЗМ, и в присутствии других редкоземельных металлов его чувствительность невелика. Это также относится к спектрофотометрии. Поскольку длины волн пиков поглощения всех комплексов РЗМ очень близки, эти методы не позволяют определять отдельные РЗМ в присутствии других.

Доля других методов определения РЗМ невелика. Прежде всего следует упомянуть рентгенофлуоресцентный анализ, основным недостатком которого является его относительно низкая чувствительность на уровне миллиграммов на килограмм, что не позволяет применять этот метод для прямого определения РЗМ в следовых количествах [11].

Применение атомно-абсорбционной спектрометрии электротермического атомирования осложняется сильным взаимодействием РЗМ и материала печи (карбидное образование), что также приводит к низкой чувствительности: характерные массы составляют несколько наногамм, что слишком велико по сравнению со значением для эффективно распыленных элементов.

Чувствительность электрохимических методов, как правило, недостаточна для определения РЗМ в большинстве образцов.

**Биотестирование** все чаще используется при оценке экологической опасности РЗМ [12]–[17].

Главное достоинство биотестирования – это простота и доступность постановки опыта, а также высокая чувствительность тест-организмов к минимальным концентрациям исследуемых токсиантов. Большим преимуществом перед методами масс-спектрометрии, атомно-абсорбционной спектрометрии и нейтронно-активационного анализа является быстрота и отсутствие потребности в дорогостоящих реактивах и оборудовании. Также при использовании этих методов, в связи с тем что концентрация РЗМ обычно очень низкая, необходима предварительная подготовка пробы – концентрирование, требующее операций, которые являются трудоемкими. Расхождение аналитических результатов сильно зависит от компетенции оператора. Кроме того, требуется строгий контроль лабораторной среды, чтобы избежать загрязнения образца и относительно большого количества проб и объемов реагентов.

При исследовании токсичности РЗМ методом биотестирования качество исследования будет зависеть от выбора трех показателей:

- 1) тест-организмов;
- 2) условий проведения испытаний;
- 3) регистрируемых показателей.

Исследование объектов окружающей среды, содержащих РЗМ, проводится с применением следующих тест-организмов: эндосимбиоз *Paramecium bursaria* и зеленых водорослей *Chlorella*.

*P. bursaria* – это одноклеточный организм, который широко встречается в реках и прудах. Микроскопическое изображение одной клетки созревшей *P. bursaria*, содержащей зеленые симбиотические водоросли, представлено на рис. 3. Также *P. bursaria* имеет реснички, необходимые для движения клетки.

Поскольку *P. bursaria* использует продукты обмена веществ эндосимбиотических зеленых водорослей в периальгальной вакуоли в качестве источника питательных веществ, культивирование *P. bursaria* намного проще, чем культивирование клеток других организмов. Таким образом, использование *P. bursaria* сделает более быструю и удобную оценку токсичности различных загрязняющих веществ.

При выборе тест-организмов для исследования токсичности РЗМ принимались во внимание следующие достоинства *P. bursaria*:

1. Повышение качества анализа, так как биотестовый анализ проводится на двух организмах одновременно (симбиоз *P. bursaria* и зеленых водорослей *Chlorella*).

2. Культивирование тест-организмов *P. bursaria* проще, чем культивирование других организмов, так как *P. bursaria* использует продукты обмена веществ эндосимбиотических зеленых водорослей в качестве источника питательных веществ.

3. Эндосимбиотические водоросли в *P. bursaria* могут быть удалены из клеток-хозяев в присутствии гербицида, параквата и альгината. Таким образом, происходит отбеливание зеленого цвета от *P. bursaria*, что может быть использовано как визуальный признак мониторинга загрязнения.

4. Кроме летального эффекта *P. bursaria* под действием токсичных металлов, можно наблюдать реакцию тест-организмов при электрическом воздействии, так как *P. bursaria* имеет свойство мигрировать к анодному электроду при воздействии электрического поля в исследуемой среде.

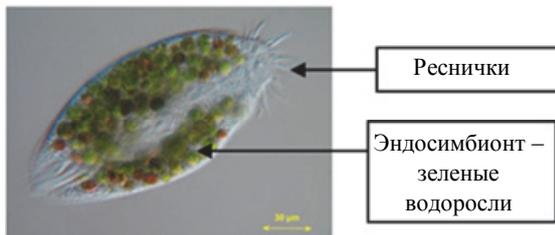


Рис. 3

Для исследования токсичности РЗМ и условий, влияющих на их токсичность, выбраны следующие металлы: скандий (Sc), иттрий (Y) и пятнадцать лантаноидов, таких как лантан (La), церий (Ce), празеодим (Pr), неодим (Nd), прометий (Pm),

самарий (Sm), европий (Eu), гадолиний (Gd), тербий (Tb), диспрозий (Dy), гольмий (Ho), эрбий (Er), тулий (Tm), иттербий (Yb).

**Биотестовый анализ токсичности РЗМ с использованием *P. bursaria*.** При исследовании на 12-луночных микропланшетах определялась средняя летальная концентрация ( $LC_{50}$  – это минимальная концентрация исследуемого вещества, которая вызывает гибель 50 % исследуемых организмов) для каждого из РЗМ в соответствии с анализом жизнеспособности клеток, описанным в [18]. Каждая лунка на микропланшетах заполнялась средой, содержащей 100 клеток *P. bursaria*, растворы РЗМ необходимо добавлять в каждую лунку (рис. 4). Затем микропланшеты инкубировались в течение 12 ч при 23 °C при непрерывном темном состоянии, и далее подсчитывая под стереомикроскопом количество живых клеток *P. bursaria*, можно получить  $LC_{50}$ .

Известно, что клетки *P. bursaria* мигрируют к анодному электроду при воздействии электрического поля в среде [19]. Этот тип движения известен как гальванотаксис. На рис. 5 приведена процедура анализа подвижности гальванотаксических клеток на основе количественного определения мигрированных клеток под действием электрических стимулов. Этот процесс позволяет оценить клеточную токсичность, РЗМ или ингибирование подвижности клеток при средней летальной концентрации ( $LC_{50}$ ) или концентрации меньше средней летальной концентрации.

Используя процедуру анализа подвижности гальванотаксических клеток на основе количественного определения мигрированных клеток под действием электрических стимулов, можно оценить клеточную токсичность РЗМ или ингибирование подвижности клеток при средней летальной концентрации.

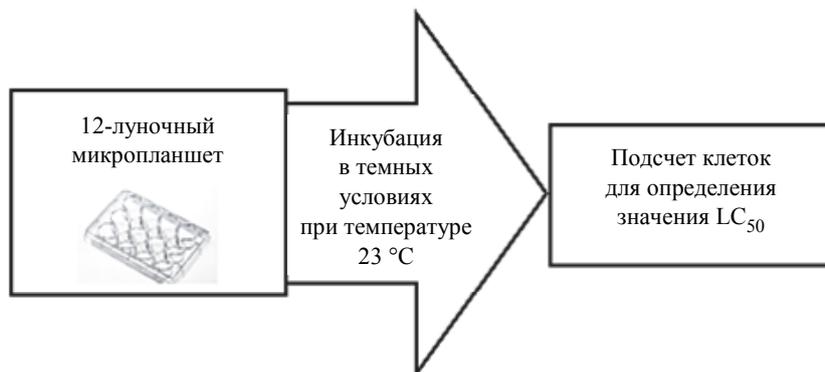


Рис. 4

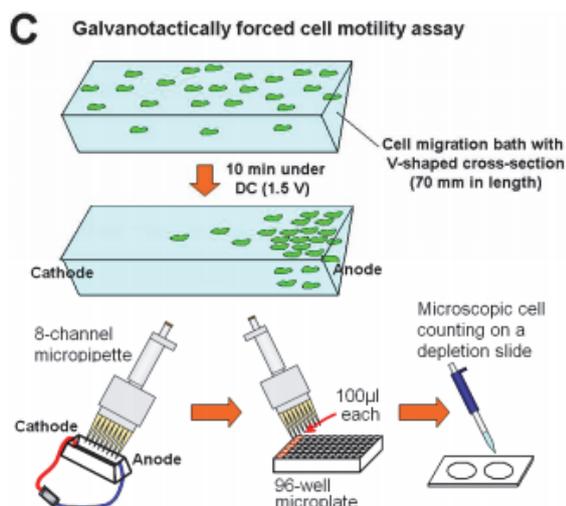


Рис. 5

Важным при постановке опыта является выбор стандартных и безопасных условий проведения испытаний. Обязательно устанавливаются и учитываются действующие факторы и диапазоны их изменения. К таким факторам относятся концентрация токсиканта, продолжительность экспозиции тест-организмов, температура среды, pH и т. д.

Необходимо учитывать критерий выживаемости тест-организмов, так как любая популяция неодинаково реагирует на токсикант. В популяции тест-организмов присутствуют особи толерантные и резистентные в отношении чувствительности к токсиканту. Более изменчивым показателем во времени является плодовитость. Это свойство тест-организмов может зависеть от сезонных колебаний.

**Эксперимент (гальванотаксическая миграция клеток *P. bursaria*).** В качестве модельного анализа для принудительной клеточной подвижности использовался метод для количественной оценки гальванотаксической миграции *P. Bursaria*, изложенный в [18].

Случайно выделенные из культуры с использованием пипетки 100 клеток были хорошо суспензированы в 2 мл культуральной среды в присутствии различных концентраций РЗМ на 12-луночных планшетах. Через 10 мин инкубации клетки переносили в ванну для миграции клеток

(с V-образным поперечным сечением, длиной 70 мм), снабженную анодом и катодом с медным покрытием, соединенным через преобразователь AC/DC, что позволяет миграции гальванотаксических клеток посредством генерируемого электрического поля с 1.5 В в течение 10 мин.

После миграции клеток и их локализации в 8 различных фракциях (по 100 мкл каждая, фракция 8-анодно-притянутые клетки, фракция 1-катодно-притянутые клетки) определяли путем отбора клеточной суспензии сразу с многоканальной пипеткой, как показано на рис. 5. Затем гальванотаксически измененные локализации клеток количественно определяли путем подсчета клеток в каждой лунке под стереомикроскопом после повторной передачи каждой фракции. Все эксперименты повторялись три раза, а средняя популяция в каждой фракции выражалась в процентах к общей популяции.

**Результаты.** Летальные воздействия (острая токсичность) ионов РЗМ оценивали в течение 12 ч и определялись значения  $LC_{50}$  для каждого из исследуемых РЗМ (см. таблицу значений показателя токсичности редкоземельных металлов для *P. bursaria*).

$LC_{50}$  (летальная концентрация) – средняя концентрация, при которой погибает 50 % организмов, которые подвергались воздействию тестируемых РЗМ.

Значения  $LC_{50}$  определялись подсчетом выживших клеток после инкубации с различными концентрациями РЗМ в течение 12 ч. Эксперименты были проделаны трижды и показаны средние значения.

Инкубация без электрической стимуляции приводила к равномерному распределению клеточной популяции после отбора проб в 8 фракций с использованием 8-канальной пипетки.

После экспозиции до 1.5 В в течение 10 мин накопление клеток в анодной фракции наблюдалось в отсутствие РЗМ.

Показатель токсичности	Тестируемые редкоземельные металлы							
	Sc	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu
$LC_{50}$	2.0	55.0	62.7	25.6	18.1	47.6	42.0	55.6
	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
$LC_{50}$	58.2	11.4	50.6	56.5	49.7	48.1	27.6	51.0

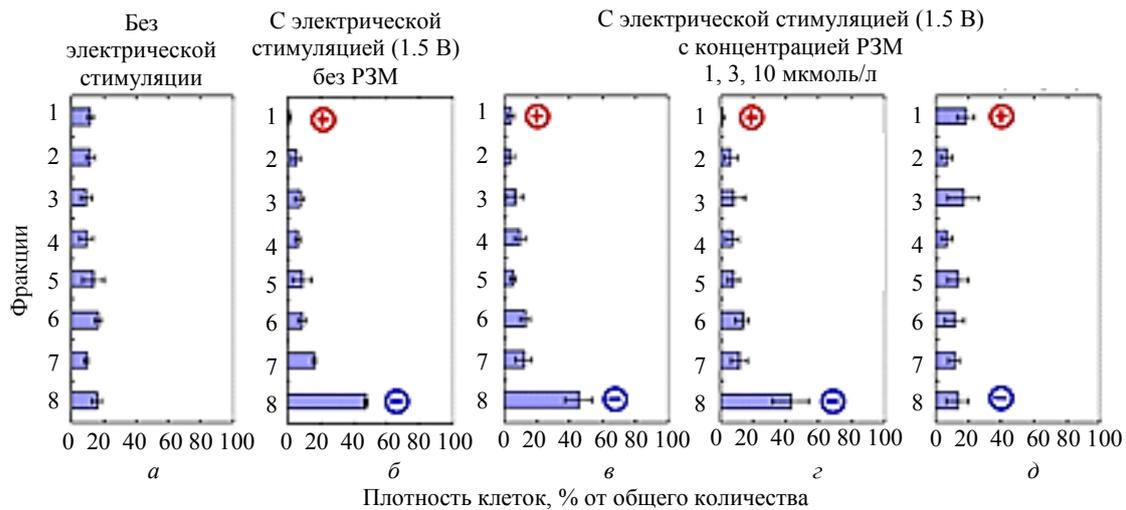


Рис. 6

Для оценки ингибирующих действий ионов РЗМ с относительно более высокой токсичностью (Sc, Ce, Tb) путем оценки гальванотаксиса *P. bursaria* клетки были инкубированы с РЗМ с концентрацией 1, 3 и 10 мкмоль/л.

Ингибирование гальванотаксиса также оценивалось с использованием РЗМ при концентрациях, которые ниже значений  $LC_{50}$ .

Время анализа подвижности при гальванотаксисе составляет 20 мин (начальные 10 мин для предварительной инкубации, еще 10 мин для гальванотаксиса).

Среди тестируемых РЗМ реагенты (Ce, Tb) ингибировали миграцию гальванотаксических клеток в концентрациях ниже  $LC_{50}$ . На рис. 6 показан пример воздействия  $CeCl_3$ , благодаря которым вынужденная миграция клеток при электрической стимуляции была значительно ингибирована при 10 мкмоль/л.

Было исследовано ингибирующее действие  $CeCl_3$  в концентрациях (ниже значения  $LC_{50} = 25.6$  мкмоль/л, см. таблицу) с помощью гальванотаксиса. На рис. 6, а приведено исходное распределение клеточной популяции в ванне длиной 70 мм с миграцией клеток, отбираемой в 8 различных фракциях, отражающих исходные положения клеток, оцененные до электрической стимуляции. На рис. 6, б приложенная электроэнергия составляет 1.5 В (10 мин). Происходит стимулированное накопление клеток вокруг анода (известное как анодный гальванотаксис). На рис. 6, в–д приведен гальванотаксис *P. bursaria*, который наблюдается в присутствии  $CeCl_3$  (1...10 мкмоль/л). Положительные и отрицательные символы указывают на положение катода и анода. Выявленная реакция *P. bursaria* на определенную концентрацию РЗМ является важным результатом исследования.

Исследование объектов окружающей среды, содержащих РЗМ, проводилось с применением следующих тест-организмов: эндосимбиоз *P. bursaria* и зеленых водорослей.

Для исследования токсичности РЗМ и условий, влияющих на их токсичность, были выбраны следующие металлы: скандий (Sc), иттрий (Y) и пятнадцать лантаноидов, таких как лантан (La), церий (Ce), празеодим (Pr), неодим (Nd), прометий (Pm), самарий (Sm), европий (Eu), гадолиний (Gd), тербий (Tb), диспрозий (Dy), гольмий (Ho), эрбий (Er), тулий (Tm), иттербий (Yb).

Среди тестируемых РЗМ реагенты (Ce, Tb) ингибировали миграцию гальванотаксических клеток в концентрациях ниже  $LC_{50}$ .

Летальные воздействия (острая токсичность) ионов РЗМ оценивали в течение 12 ч и определяли значения  $LC_{50}$  для каждого из РЗМ. Испытуемые РЗМ различались по степени токсичности: токсичные, умеренно токсичные и относительно менее токсичные.

Настоящее исследование показало, что большинство членов РЗМ могут вызвать определенные искажения в клетках *P. bursaria* даже ниже смертоносных концентраций.

Виды *Paramecium*, включая зеленую парамецию, проявляют гальванотаксис, который является направленным движением клеток к аноду путем перемещения с помощью ресничек, индуцированного в ответ на приложенное напряжение, поэтому этот организм привлекает внимание исследователей, желающих использовать живые организмы в качестве платформы для проектирования механизмов микробиотехники. И так как клетки *P. bursaria* сообщают о присутствии ионов РЗМ, понижая электрически принудительную подвижность в нелетальных диапазонах концен-

траций РЗМ, это может послужить толчком к разработке биосенсоров на основе *P. bursaria*, кото-

рые будут определять токсичность редкоземельных металлов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Atwood D. A. The Rare Earth Elements: Fundamentals and Applications. UK: John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, 2012.
2. Abigail Walters, Paul Lusty, Amanda Hill. Rare earth elements: Report British Geological Survey. United Kingdom: Nottingham, 2011. 54 p.
3. Chronic toxicity of rare-earth elements on human beings: implications of blood biochemical indices in REE-high regions, South Jiangxi / H. Zhang, J. Feng, W. Zhu, C. Liu, S. Xu, P. Sao, D. Wu, W. Yang, J. Gu // Biol. Trace Elem. Res. 2000. Vol. 73. № 1. P. 1–17.
4. Use of lanthanides to alleviate the effects of metal ion-deficiency in *Desmodesmus quadricauda* (Sphaeropleales, Chlorophyta) / F. Goecke, C. G. Jerez, V. Zachleder, F. L. Figueroa, K. Bisova, T. Rezanka, M. Vitova // Czech Republic Laboratory of Cell Cycles of Algae, 2015.
5. Concentrations and distribution patterns of rare earth elements in water body from intertidal flat of Tianjin and influence of various factors / W. Lijun, L. Tao, Z. Chaosheng, D. Shiming, D. Liqiang, Y. Xin // J. Rare Earths. 2004. Vol. 22, № 6. P. 896–903.
6. Damian P. A Literature Review of the Health and Ecological Effects of the Rare Earth Elements. Stand Alone Report 14, Union Blvd, 2014. 51 p.
7. Некоторые вопросы токсичности ионов металлов: пер. с англ. / под ред. Х. Зигеля, А. Зигель. М.: Мир, 1993. 368 с.
8. Willie S. N., Sturgeon R. E. Determination of transition and rare earth elements in seawater by flow injection inductively coupled plasma time-offlight mass spectrometry // Spectrochim. Acta. 2001. Vol. 56, № 9. P. 1707–1716.
9. Premadas A. Cation exchange chromatographic group separation and ICP-AES determination of rare earth elements and yttrium in refractory minerals zircon, ilmenite, rutile, columbitetantalite, garnet, and silliminite // At. Spectrosc. 2003. Vol. 24, № 4. P. 149–158.
10. Rare earth elements determination and distribution patterns in surface marine sediments of the South China Sea by INAA, Malaysia / Kh. Rezaee, E. B. Saion, A. K. Wood, M. R. Abdi // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2010. Vol. 283, № 3. P. 823–829.
11. Panteeva S. V. Specific features of determination of some rare earth element contents in rock samples with different composition by the inductively coupled plasma mass spectrometry and X-ray fluorescence analysis // Anal. Kontrol. 2009. Vol. 13, № 4. P. 184–192.
12. Oxidative injury in the brain of mice caused by lanthanide / H. Zhao, Z. Cheng, R. Hu, J. Chen, M. Hong, M. Zhou, X. Gong, L. Wang, F. Hong // Biol Trace Elem Res. 2011. № 142. P. 174–189.
13. Immune dysfunction and liver damage of mice following exposure to lanthanoids / J. Cheng, Z. Cheng, R. Hu, Y. Cu, J. Cai, N. Li, S. Gui, X. Sang, Q. Sun, L. Wang, F. Hong // Environ Toxicol. 2014. № 29. P. 64–73.
14. Баренбойм Г. М., Авандеева О. П., Коркина Д. А. Редкоземельные элементы в водных объектах (экологические аспекты) // Вода: химия и экология. 2014. № 5. С. 42–55.
15. Toxicity of cerium and thorium on *Daphnia magna* / Ma Yuhui, Wang Jingkun, Peng Can, Ding Yayun, He Xiao, Zhang Peng, Li Na, Lan Tu, Wang Dongqi, Zhang Zhaohui, Sun Fuhong, Liao Haiqing, Zhang Zhiyong // Ecotoxicol Environ Saf. 2016. № 134. P. 226–232.
16. Jinxia Li b, Verweij R. A., van Gestel C. A. M. Lanthanum toxicity to five different species of soil invertebrates in relation to availability in soil // Chemosphere. 2018. Vol. 193. P. 412–420.
17. Токсичность лантана и церия в условиях биотеста с луком репчатым (*Allium cepa*) / А. Д. Котельникова, И. А. Фастовец, О. Б. Рогова, В. В. Столбова // Бюл. Почв. ин-та им. В. В. Докучаева. 2017. Вып. 89. С. 54–67
18. Aonuma M., Kadono T., Kawano T. Inhibition of anodic galvanotaxis in green paramecia by T-type calcium channel inhibitors // Z. Naturforsch. 2007. № 62. P. 93–102.
19. Toxicity of Nine (Doped) Rare Earth Metal Oxides and Respective Individual Metals to Aquatic Microorganisms *Vibrio fischeri* and *Tetrahymena thermophila* / I. Kurvet, K. Juganson, H. Vija, M. Sihtmae, I. Blinova, G. Syversen-Wig, A. Kahru // Materials. 2017. Vol. 10. P. 754.

I. S. Zakharov, L. V. Kontrosh, A. V. Hramov, O. I. Shumilov  
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

## ON THE QUESTION OF ENVIRONMENTAL RISKS OF RARE-EARTH METALS

*Problem of rare earth metals (REM) and the possible danger of rare earth metals for human health are considered in the article. The main drawbacks of modern methods for studying the toxicity of rare-earth metals are given. Particular attention is paid to the possibility of using bioassay to determine the toxicity of rare earth metals. The method of bioassay on the basis of galvanotaxis, using multiple exposure to test organisms, representing symbiosis of *Paramecium bursaria* and green algae *Chlorella*, is considered. This method is effective for studying the toxicity of rare earth metals, since the effect of the toxicity of rare earth metals on the *Paramecium bursaria* has not only a lethal effect, but also *Paramecium bursaria* reports the presence of rare earth metals by reducing electrically forced mobility. This study was designed to test whether the *Paramecium bursaria* are applicable, in the development of a biosensor based on the detected reaction to detect a certain concentration of rare earth metals.*

**Rare earth metals, inductively coupled plasma spectrometry, atomic emission spectroscopy, neutron activation analysis, bioassay, galvanotaxis, *Paramecium bursaria*, biosensor**