

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

УДК 579.266:546.65

ВЛИЯНИЕ ЛАНТАНОИДОВ НА МЕТАНОТРОФЫ И ДРУГИЕ ОРГАНИЗМЫ

Sizov L.R.

кандидат биологических наук, инженер

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,
г. Москва, Россия*

Аннотация

В связи с ростом добычи и потребления редкоземельных элементов, включая лантаноиды, растёт их концентрация в экосистемах. В связи с этим всё более актуальным вопросом становится вопрос их влияния на живые организмы, в особенности те, в метаболизме которых определено участие лантаноидов. В данном обзоре рассматриваются данные о влиянии лантаноидов на функциональность на метанотрофов, а также обсуждается распределение лантаноидов в экосистемах и влияние лантаноидов на другие компоненты живой природы.

Ключевые слова: лантаноиды, редкоземельные элементы, метанотрофы, лантаноид-зависимая метанолдегидрогеназа, лантаноиды в почве.

THE EFFECT OF LANTHANIDES ON METHANOTROPHS AND OTHER ORGANISMS

Sizov L.R.

PhD in biology, engineer,

*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

Abstract

The increasing production and consumption of rare earth elements, including lanthanides, is leading to their rising concentrations in ecosystems. Consequently, understanding their impact on living organisms, particularly those that utilize lanthanides in their metabolism, is becoming increasingly important. This review examines the effects of lanthanides on methanotroph functionality and discusses the distribution of lanthanides in ecosystems, along with their impact on other organisms.

Key words: lanthanides, rare earth elements, methanotrophs, lanthanide-dependent methanol dehydrogenase, lanthanides in soil.

Редкоземельные элементы (РЗЭ) высоко востребованы в производстве электродвигателей, аккумуляторов, экранов и многих других продуктов, и повышение масштабов их добычи будет неизбежно повышать загрязнённость ими окружающей среды [1]. В связи с этой антропогенной нагрузкой возникает вопрос влияния РЗЭ на живую природу. В частности известно, что лантаноиды регулируют активность метилотрофов, в том числе метанотрофов, окисляющих метanol до формальдегида [2]. Метанотрофные прокариоты выполняют в почвенных и пресноводных экосистемах важную экологическую функцию окисления метана, предотвращая его эмиссию в атмосферу и повышение вклада в парниковый эффект. В качестве биологического фильтра метанотрофы потребляют приблизительно 10% от общего объема метана на планете, возвращая от него углерод в биологический круговорот [3]. Таким образом, исследование влияния лантаноидов на функцию метанотрофов является актуальной задачей в рамках высокой интенсивности добычи РЗЭ и глобального потепления. Также в данном обзоре обсуждается распределение лантаноидов в экосистемах и влияние лантаноидов на другие компоненты живой природы для получения общей картины последствий загрязнения ими окружающей среды.

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

Общие сведения о лантаноидах. Лантаноиды представляют собой группу из 15 химических элементов с зарядовыми числами (Z) от 57 (лантан, La) до 71 (лютеций, Lu), которые вместе со скандием (Sc, $Z=21$) и иттрием (Y, $Z=39$) относят к РЗЭ. Объединение этих элементов обусловлено схожестью электронной конфигурации внешних валентных уровней, определяющей близость химических характеристик и некоторых физических свойств. Все РЗЭ представляют собой серебристо-белые металлы, преимущественно имеющие степень окисления +3 в соединениях. При сохранении химического подобия, элементы демонстрируют значительные различия в магнитных и оптических характеристиках. Согласно современной классификации, лантаноиды подразделяют на две подгруппы: легкие (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu) и тяжелые (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) [4].

Несмотря на сложившееся название, РЗЭ достаточно распространены в природе, за исключением прометия (Pm), не имеющего стабильных изотопов. Их среднее содержание в земной коре достигает 0,015%, однако особенностью является рассеянный характер распределения [4]. Наиболее распространенный представитель группы — церий (Ce) — занимает 25-е место по распространенности среди элементов земной коры с кларком, сопоставимым с медью (60-70 ppm). Неодим (Nd) и La имеют концентрации 38 ppm и 32 ppm соответственно [5].

Исторически до 2010 года доминирующим поставщиком РЗЭ являлся Китай, отвечая на высокий спрос РЗЭ, однако после введения там экспортных ограничений произошла диверсификация источников добычи, включая активизацию производственных мощностей в России [6].

Лантаноиды в почве. Лантаноиды в природных системах находятся в полиминеральных ассоциациях, обнаруживаясь в составе апатитов, баритов, изверженных пород (граниты, базальты, пироксениты, андезиты), осадочных отложениях (глины), гидросфере (морская вода), а также в органических субстратах (каменный уголь, нефть) и биологических объектах. Химическое
Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМИ ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

поведение лантаноидов преимущественно определяется трехвалентным состоянием, в котором они формируют стабильные оксиды X_2O_3 , галогениды $XHal_3$ и сульфиды XS . Отдельные элементы демонстрируют атипичные степени окисления: +2 (комплексные соединения Eu, Yb [7]) и +4 (Ce, Pr, Tb [8]), что обусловлено особенностями электронной конфигурации их 4f-орбиталей. Минералогическое разнообразие представлено более 200 минералами с содержанием РЗЭ >0,01%, включая более 70 РЗЭ с их повышенным содержанием (до 70%): лопарит, монацит, ксенотит и другие [9].

Концентрация и распределение лантаноидов в почвах определяются литологическим составом материнских пород и процессами гипергенеза. В ходе выветривания происходит глобальное выщелачивание лантаноидов из почвенного профиля с последующей аккумуляцией в коллоидных системах речных и морских бассейнов [10].

На миграцию и аккумуляцию лантаноидов влияет комплекс влияющих на их растворимость почвенных характеристик, включая содержание гумусовых веществ, величина pH, окислительно-восстановительный потенциал, гранулометрический состав, степень гидроморфности, а также возраст и происхождение почвы и антропогенная нагрузка. Интенсивность выноса элементов возрастает в условиях гумидного климата, достигая максимума в тропических латеритных корах выветривания. Подкисление почв существенно усиливает подвижность лантаноидов, в особенности легких элементов (Ce, Nd, La), растворимость которых вырастает до 3–5 мг/л в камбисолях [10].

Определенные растения, такие как папоротники, мхи и лишайники, функционируют как биологические концентраторы, способствуя накоплению лантаноидов в гумусовом горизонте. Микробные сообщества также вносят значительный вклад в перераспределение лантаноидов: железоокисляющие бактерии *Gallionella ferruginea* демонстрируют способность к сверхконцентрации лантаноидов, а представители рода *Arthrobacter* участвуют

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

в высвобождении тяжелых лантаноидов при растворении силикатных минералов [10].

Суммарное содержание РЗЭ в почвах варьирует в интервале 30-700 мкг/г, что сопоставимо с концентрациями таких тяжелых металлов как кадмий, медь и свинец [11]. В лесных почвах России, формирующихся на суглинистых отложениях в гумидных условиях, отмечается ограниченное участие лантаноидов в почвообразовательных процессах из-за отсутствия их аккумуляции в верхних горизонтах. Данная особенность обусловлена комплексом факторов: преобладанием фульвокислот в составе гумуса, кислым рН почвенного раствора (4,5–5,5) и промывным водным режимом [12].

Например, исследования подзолистых почв Смоленско-Московской возвышенности выявили валовое содержание La 31-33 мкг/г и Ce 64-66 мкг/г в гумусовых горизонтах, тогда как значения концентраций остальных лантаноидов не превышали 10 мкг/г. Анализ гранулометрических фракций показал, что илистая фракция почвообразующих суглинков содержит больше лантаноидов по сравнению с органогенными горизонтами развитых на них почв [12].

Содержание лантаноидов в почвах увеличивается с переходом к более тяжелому гранулометрическому составу. Так, в аллювиальных почвах бассейна Амура валовое содержание РЗЭ в верхних горизонтах было определено как 60 мкг/г в песчаных и 160 мкг/г в легкосуглинистых почвах. Хотя при этом концентрация подвижных форм в данных почвах не превышает 1-10 мкг/г, что свидетельствует о пребывании большей части лантаноидов в формах, прочно связанных с минеральной матрицей и недоступных для живых организмов [13].

Паводковые явления приводят к повышению содержания и перераспределению РЗЭ при их высоком содержании в растворенном и взвешенном веществе паводковых вод. После паводка реки Амур в аллювиальных почвах было определено увеличение валового содержания РЗЭ на 10%, при этом их концентрация в подвижной форме выросла на 70% [13].

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

Значительным источником поступления лантаноидов в почвы являются фосфатные руды, используемые в производстве минеральных удобрений. Исходное сырье может содержать до 147 мг/кг лантана и 453 мг/кг церия, которые мигрируют в конечную продукцию: аммонийный фосфат (149 мг/кг La, 408 мг/кг Ce) и тройной суперфосфат (63 мг/кг La, 159 мг/кг Ce) [14]. Российские апатитовые руды, применяемые для производства фосфорных удобрений, содержат около 0,4% РЗЭ [15]. Дополнительным источником может служить известняк-наполнитель: совокупное поступление лантана в почву при использовании суперфосфатов с известняком оценивается в 0,942 мг/кг/год [16].

Техногенное загрязнение лантаноидами регистрируется вблизи предприятий горнодобывающей и химической промышленности. В снежном покрове рядом с производством фосфорных удобрений зафиксировано превышение фоновых концентраций La в 9,6 раз (454 мг/кг) и Ce в 7,7 раз (660 мг/кг) [17].

Особенностью сельскохозяйственной практики Китая является применение микроудобрений с лантаноидами для предпосевной обработки семян и внекорневой подкормки на почвах с дефицитом доступных форм этих элементов. В работе Xie et al. было показано, что при достижении определённой концентрации La увеличивается ёмкость катионного обмена почв, что благоприятно для урожайности [18]. Стандартные дозировки лантаноидов не превышают 0,23 кг/га в год [18], тем не менее масштабы применения достигают тысяч тонн РЗЭ, ежегодно вносимых на сельскохозяйственные угодья [19].

Воздействие лантаноидов на растения. Убедительных доказательств о физиологической необходимости лантаноидов не выявлено, однако отдельные представители данной группы, преимущественно высококларковые легкие элементы (La, Ce, Nd), демонстрируют биологическую активность.

Установлено, что низкие концентрации лантаноидов (до 10 мг/кг подвижных форм) способны стимулировать продукцию биомассы и ростовые процессы у сосудистых растений. Лантан в малых дозах влияет на активность Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМИ ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

ферментов и фитогормонов, участвующих в онтогенетическом развитии растений [4]. Наблюдается способность ионов La^{3+} и Ce^{3+} к замещению магния Mg^{2+} в молекуле хлорофилла без потери её функциональных свойств, более того для растения арахиса показано при этом повышение скорости фотосинтеза [20]. Критическим аспектом является дозозависимый характер действия лантаноидов: при концентрациях, превышающих 100 мг/кг почвы, может проявляться уже фитотоксический эффект [4].

Как было описано выше, лантаноиды могут также благоприятно влиять на урожайность через повышение емкости катионного обмена в почве [18]. Выявленные ростостимулирующие свойства лантаноидов в сочетании с развитой сырьевой базой обусловили практическое применение их соединений в сельском хозяйстве Китая в качестве микроудобрений, направленных на повышение урожайности сельскохозяйственных культур [21].

Воздействие лантаноидов на животных и человека Лантаноиды не обладают высокой токсичностью, однако их растущее промышленное применение актуализирует необходимость комплексной оценки биологических эффектов, оказываемых этими элементами на животных и человека. Экспериментальные исследования на крысах, подвергшихся воздействию соединений Ce, продемонстрировали преимущественную аккумуляцию элемента в легочной и печеночной тканях с развитием органоспецифичных патологических изменений. При этом, аналогично наблюдаемому у растений явлению, умеренные дозировки не вызывают негативных последствий [22].

В сельскохозяйственной практике соединения лантаноидов находят применение в качестве кормовых добавок, способствующих увеличению живой массы скота и продуктивности молочного животноводства. У свиней отмечено улучшение усвояемости питательных элементов на фоне применения добавок РЗЭ. В аквакультуре РЗЭ используются в профилактических целях для снижения заболеваемости рыб [22].

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

В контексте глобальной миграции элементов особую значимость приобретает процесс постепенного выноса лантаноидов в водные экосистемы, создающий предпосылки для их биоаккумуляции в гидробионтах [23].

Лантаноиды способны проникать в организм человека через пищеварительный тракт, респираторную систему и кожные покровы. Длительная экспозиция может вызывать ряд патологических состояний, включая артериальную гипотензию, мультифокальный гепатит, пневмокониоз лёгочной ткани, кальциноз печени и селезёнки. Эпидемиологические исследования в регионах с повышенным фоном РЗЭ выявили корреляцию с когнитивными нарушениями у детей. Экспериментально подтверждена способность РЗЭ нарушать митотический цикл и индуцировать цитогенетические аномалии [24].

Тем не менее клинически значимые эффекты проявляются лишь при достижении высоких концентраций, редко встречающихся в природных условиях. Потребление пищевых продуктов и воды в зонах влияния добывающих РЗЭ предприятий обычно не приводит к острым интоксикациям [25]. Оценка рисков при ингаляционном поступлении РЗЭ с урбанизированной пылью в промышленных центрах Китая показала минимальное влияние на здоровье населения [24].

Основной риск для населения эндемичных территорий связан с кумулятивным эффектом – постепенной биоаккумуляцией РЗЭ в органах-мишениях с потенциальным развитием респираторной патологии и отдалённых системных последствий. Отсутствие законодательных нормативов содержания лантаноидов обусловлено недостаточной изученностью их биологических эффектов, низким потенциалом аккумуляции в экосистемах и сравнительно умеренной токсичностью [24].

Влияние лантаноидов на неметилотрофные бактерии. Проведенные исследования демонстрируют дозозависимое влияние лантаноидов на почвенные микробиомы. Экстремально высокие дозировки солей лантана (1000

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

мг/кг) ингибируют дегидрогеназную и дыхательную активность почвенных микроорганизмов [26]. В агроценозах чайных плантаций установлено, что высокие концентрации La (>600 мг/кг) вызывают устойчивое снижение содержания углерода и фосфора в микробной биомассе, подавление ферментативной активности и подкисление почвенной среды, причем данные изменения сохраняются в течение 56-дневного периода наблюдений. Даже при меньшей дозе (300 мкг/г) отмечается негативное воздействие на параметры микробной биомассы и активность фосфатаз. На основании полученных данных определен порог безопасности внесения лантана — менее 100 мкг/г [27].

В то же время на примере почв Бурятии было показано, что умеренные дозы сульфата лантана (3-6 мг/кг) стимулируют развитие аммонифицирующих и нитрифицирующих бактерий, активизируя процессы азотного цикла и потенциально повышая продуктивность сельскохозяйственных культур [28]. Схожий результат с повышением нитрифицирующей активности микробного сообщества при добавлении соли лантана был определен для дерново-подзолистой почвы [29].

Наличие специфических эффектов РЗЭ на некоторые неметилотрофные бактерии — скандий усиливает биосинтез антибиотиков у актинобактерий рода *Streptomyces* [30], а Се индуцирует продукцию экзополисахаридов у *Bradyrhizobium* sp. [31] — свидетельствует о наличии молекулярных механизмов влияния этих элементов на метаболизм бактерий, требующих дальнейшего изучения.

Влияние лантаноидов на метанотрофные бактерии. Открытие лантаноид-зависимой метанолдегидрогеназы (ХoxF-MDH) у метилотрофов (в том числе метанотрофов, окисляющих сначала метан до метанола и потом метанол до формальдегида и далее) стало первым примером биологической роли лантаноидов в качестве кофакторов ферментов [2]. Позднее был идентифицирован другой фермент данного класса — лантаноид-зависимая

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

этанолдегидрогеназа ExaF, выделенная из *Methylobacterium extorquens* AM1 [32].

Механизм вовлечения лантаноидов в ферментативные процессы обусловлен их физико-химическим сходством с ионами кальция, который входит в состав кальций-зависимых метанолдегидрогеназ (MxaF-MDH). Близость ионных радиусов (Ca^{2+} – 0,099 нм, La^{3+} – 0,110 нм, Ce^{3+} – 1,102 нм, Pr^{3+} – 0,099 нм, Nd^{3+} – 0,098 нм) предопределяет способность легких лантаноидов к изоморфному замещению кальция в активных центрах дегидрогеназ с образованием стабильных координационных комплексов [33], и в целом XoxF-MDH демонстрирует функциональную активность с широким спектром лантаноидов [34].

Регуляция экспрессии генов метанолдегидрогеназ у метилотрофных и метанотрофных бактерий осуществляется под влиянием даже наномолярных количествах лантаноидов [2]. Исследования на *Methylosinus trichosporium* OB3b показали, что присутствие Ce активирует экспрессию генов *xoxF*, кодирующих синтез XoxF-MDH, при одновременном снижении экспрессии генов *mxaFI*, кодирующих синтез MxaF-MDH. Медь способна компенсировать ингибирующее действие Ce на экспрессию *mxaFI*, не влияя при этом на активацию *xoxF*. В то же время Ce никак обратно не влияет на способность меди повышать также экспрессию мембранный метанмонооксигеназы (рММО) и снижать экспрессию растворимой метанмонооксигеназы (sММО) метанотрофа. Данные закономерности свидетельствуют о возможном формировании функционального суперкомплекса между MxaF-MDH и рММО [6], хотя также такие комплексы предполагают между XoxF-MDH и рММО [35].

У *Methylomicrobium buryatense* 5GB1C добавление лантаноидов вызывает экспрессию *xoxF* даже при значительном превышении концентрации кальция, что указывает на предпочтительность лантаноид-зависимого метаболического пути [36]. Аналогичная предпочтительность XoxF-системы наблюдается у штаммов *Methylobacterium extorquens* AM1 [37] и *Methylobacterium extorquens* Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМИ ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

PA1 [38], а также *Methylobacterium aquaticum* 22A [39], что свидетельствует о большей эффективности фермента XoxF по сравнению с MxaF-MDH [40]. В синтрофных ассоциациях метанотрофов с неметанотрофными метилотрофами был определен феномен, при котором присутствие метилотрофных спутников индуцирует переход метанотрофов с XoxF-MDH на менее эффективную MxaF-MDH, способствуя накоплению метанола в среде для собственного потребления [41].

Эксперименты с синтетической ассоциацией, состоящей из метанотрофов семейства *Methylococcaceae* и неметанотрофных метилотрофов семейства *Methylphilaceae*, выявили сложный характер регуляции экспрессии генов метанолдегидрогеназ, на которую влияют и другие факторы помимо присутствия лантаноидов. В среде без добавления лантаноидов при использовании нитратов в качестве источника азота и при высокой концентрации метана у большинства штаммов наблюдалась ожидаемая высокая экспрессия *mxaFI*, но при этом замена источника азота на аммоний или низкое содержание метана и кислорода приводили к росту экспрессии *xoxF*. В условиях высокого содержания метана при одновременном дефиците кислорода уровень экспрессии обеих систем выравнивался. Кроме того, регуляция экспрессии зависела от вида бактерии, что, по-видимому, связано с количеством копий гена *xoxF* в бактериальном геноме [42].

Хотя экспрессия генов *xoxF* может происходить в отсутствие лантаноидов, от их присутствия каталитическая активность соответствующего фермента XoxF-MDH [2]. Лантаноиды также опосредуют уменьшение концентрации формальдегида в среде и снижение активности формальдегиддегидрогеназы, что объясняется способностью XoxF-MDH часто осуществлять прямое окисление метанола до формиата, минуя стадию свободного формальдегида [39]. Влияние лантана на рост и разнообразие метано- и метилотрофов требует дальнейшего изучения. Так, на параметры роста культуры метанотрофа *Methylosinus trichosporium* ОВ3б, добавление Ce³⁺

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

в концентрации 25 мкмоль/л слабо влияет [6]. Тем не менее на уровне микробного сообщества дерново-подзолистой почвы было определено, что при добавлении хлорида лантана происходит повышение вклада в сообщество метанотрофов I типа и облигатных метилотрофов рода *Methylo lotenera* [29].

Заключение. Таким образом, несмотря на рассеянный тип нахождения, лантаноиды могут накапливаться в живых организмах, в особенности в гидробионтах, и участвовать в метаболизме растений и бактерий, в особенности метано- и метилотрофов, а также оказывать некоторое влияние на животных и человека в больших концентрациях, достижение которых возможно при антропогенном загрязнении. На метанотрофов оказывают влияние лёгкие лантаноиды (лантан, церий), регулируя вторую и в некоторых случаях третью ступени окисления метана, то есть процессы окисления метанола и формальдегида. В умеренных количествах лантаноиды могут благоприятно влиять на микробную активность в почве и урожайность растений, что делает их потенциально полезными для применения в сельском хозяйстве.

Библиографический список:

1. Understanding Rare Earth Elements as Critical Raw Materials / W. Leal Filho, R. Kotter, P. G. Özuyar [et al.] // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – № 3. – P. 1919.
2. Chistoserdova, L. Lanthanides: New life metals? / L. Chistoserdova // World Journal of Microbiology and Biotechnology. – 2016. – Vol. 32. – № 8. – P. 138.
3. Lowe, D. C. A green source of surprise / D. C. Lowe // Nature. – 2006. – Vol. 439. – № 7073. – P. 148-149.
4. Котельникова, А.Д. Лантаноиды в почве: поступление, содержание, влияние на растения, генотоксичность (обзор) / А.Д. Котельникова, О. Б. Рогова, В. В. Столбова // Почвоведение. – 2021. – № 1. – С. 100-119.
5. Cerium Regulates Expression of Alternative Methanol Dehydrogenases in *Methylosinus trichosporium* OB3b / M. Farhan Ul Haque, B. Kalidass, N. Bandow

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

[et al.] // Applied and environmental microbiology. – 2015. – Vol. 81. – № 21. – P. 7546-52.

6. Cerium Regulates Expression of Alternative Methanol Dehydrogenases in *Methylosinus trichosporium* OB3b / M. Farhan Ul Haque, B. Kalidass, N. Bandow [et al.] // Applied and environmental microbiology. – 2015. – Vol. 81.

7. Completing the Series of +2 Ions for the Lanthanide Elements: Synthesis of Molecular Complexes of Pr²⁺, Gd²⁺, Tb²⁺, and Lu²⁺ / M. R. MacDonald, J. E. Bates, J. W. Ziller [et al.] // Journal of the American Chemical Society. – 2013. – Vol. 135. – № 26. – P. 9857-9868.

8. Accessing the +IV Oxidation State in Molecular Complexes of Praseodymium / A. R. Willauer, C. T. Palumbo, F. Fadaei-Tirani [et al.] // Journal of the American Chemical Society. – 2020. – Vol. 142. – № 12. – P. 5538-5542.

9. Jordens, A. A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals / A. Jordens, Y. P. Cheng, K. E. Waters // Minerals Engineering. – 2013. – Vol. 41. – P. 97-114.

10. Водяницкий, Ю. Н. Биогеохимия лантанидов в почвах / Ю. Н. Водяницкий, О. Б. Рогова // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2016. – Т. 84. – С. 101-118.

11. Дабах, Е. В. Редкоземельные элементы в почвах природных и техногенных ландшафтов Кировской области / Е. В. Дабах // Теоретическая и прикладная экология. – 2016. – № 3. – С. 56–67.

12. Самонова, О. А. Редкоземельные элементы в почвах ландшафтов Смоленско-Московской возвышенности / О. А. Самонова // Вестник Московского Университета. Сер. 5, География. – 2013. – № 3. – С. 73-79.

13. Мартынов, А. В. Оценка влияния крупного паводка на содержание микроэлементов в аллювиальных почвах в среднем течении реки / А.В. Мартынов // Бюлл. Почвенного института им. Докучаева. – 2018. – № 91. – С. 110-131.

14. Raven, K. P. Trace Element Composition of Fertilizers and Soil
Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМИ ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

Amendments / K. P. Raven, R. H. Loepert // Journal of Environmental Quality. – 1997. – Vol. 26. – № 2. – P. 551-557.

15. Папкова, М. В. Сорбционное извлечение редкоземельных металлов и других элементов из растворов фосфорной кислоты / М. В. Папкова, А. И. Михайличенко, Т. В. Конькова // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2019. – Т. 16. – № 2. – С. 163-172.

16. Heavy metals and rare earth elements in phosphate fertilizer components using instrumental neutron activation analysis / A. S. Abdel-Haleem, A. Sroor, S. M. El-Bahi, E. Zohny // Applied Radiation and Isotopes. – 2001. – Vol. 55. – № 4. – P. 569-573.

17. Phosphorus fertilizer production as a source of rare-earth elements pollution of the environment / A. A. Volokh, A. V Gorbunov, S. F. Gundorina [et al.] // Science of The Total Environment. – 1990. – Vol. 95. – P. 141-148.

18. Influence of exogenous lanthanum on fertility parameters of red soil and paddy soil / Z. B. Xie, J. G. Zhu, H. Y. Chu [et al.] // J. Rare Earth. – 2001. – Vol. 19. – P. 229–232.

19. A human health risk assessment of rare earth elements in soil and vegetables from a mining area in Fujian Province, Southeast China / X. Li, Z. Chen, Z. Chen, Y. Zhang // Chemosphere. – 2013. – Vol. 93. – № 6. – P. 1240-1246.

20. Effect of Some Rare Earth Elements on Dry Matter Partitioning, Nodule Formation and Chlorophyll Content in *Arachis hypogaea* L. Plants / E. S. C. Emmanuel, A. M. Ramachandran, A. D. Ravindran [et al.] // Australian Journal of Crop Science. – 2010. – Vol. 4. – № 9. – P. 670-675.

21. Pang, X. Application of rare-earth elements in the agriculture of China and its environmental behavior in soil / X. Pang, D. Li, A. Peng // Environmental Science and Pollution Research. – 2002. – Vol. 9. – № 2. – P. 143-148.

22. Rare earth elements in human and animal health: State of art and research priorities / G. Pagano, F. Aliberti, M. Guida [et al.] // Environmental Research. – 2015. – Vol. 142. – P. 215-220.

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

23. Potential Hazard of Lanthanides and Lanthanide-Based Nanoparticles to Aquatic Ecosystems: Data Gaps, Challenges and Future Research Needs Derived from Bibliometric Analysis / I. Blinova, M. Muna, M. Heinlaan [et al.] // Nanomaterials. – 2020. – Vol. 10. – № 2. – P. 328.
24. Rare earth elements in street dust and associated health risk in a municipal industrial base of central China / G. Sun, Z. Li, T. Liu [et al.] // Environmental Geochemistry and Health. – 2017. – Vol. 39. – № 6. – P. 1469-1486.
25. A human health risk assessment of rare earth elements in soil and vegetables from a mining area in Fujian Province, Southeast China / X. Li, Z. Chen, Z. Chen, Y. Zhang // Chemosphere. – 2013. – Vol. 93. – № 6. – P. 1240-1246.
26. Effects of lanthanum on dehydrogenase activity and carbon dioxide evolution in a Haplic Acrisol / H. Y. Chu, J. G. Zhu, Z. B. Xie [et al.] // Australian Journal of Soil Research. – 2003. – Vol. 41. – № 4. – P. 731-739.
27. Influence of lanthanum on microbial biomass C, P and C- and P-cycling enzyme activities in tea garden soil / Y.-F. Hu, X.-Y. Shu, J. He [et al.] // Archives of Agronomy and Soil Science. – 2017. – Vol. 63. – № 5. – P. 700-709.
28. Чимитдоржиева, И. Б. Влияние лантана на экологическую устойчивость аммонифицирующих и нитрифицирующих микроорганизмов в условиях *in vitro* и их биологическую активность в вегетационных опытах / И. Б. Чимитдоржиева, Н. Е. Абашеев, В. Ц. Цыдыпов // Агрохимия. – 2008. – № 4. – С. 60-64.
29. Kravchenko, I. K. Laboratory Study of the Effect of Ammonium and Lanthanum Salts on Methane Oxidation and Composition of Microbial Communities in Soddy-Podzolic Soil / I. K. Kravchenko, L. R. Sizov, L. V Lysak // Eurasian Soil Science. – 2023. – Vol. 56. – № 5. – P. 573-583.
30. The rare earth, scandium, causes antibiotic overproduction in *Streptomyces* spp. / K. Kawai, G. Wang, S. Okamoto, K. Ochi // FEMS Microbiology Letters. – 2007. – Vol. 274. – № 2. – P. 311-315.
31. Ce³⁺-induced exopolysaccharide production by *Bradyrhizobium* sp.

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

MAFF211645 / N. A. Fitriyanto, M. Nakamura, S. Muto [et al.] // Journal of Bioscience and Bioengineering. – 2011. – Vol. 111. – № 2. – P. 146-152.

32. Pyrroloquinoline Quinone Ethanol Dehydrogenase in *Methylobacterium extorquens* AM1 Extends Lanthanide-Dependent Metabolism to Multicarbon Substrates / N.M. Good, H.N. Vu, C.J. Suriano [et al.] // Journal of Bacteriology. – 2016. – Vol. 198. – № 22. – P. 3109-3118.

33. Гринвуд, Н. Химия элементов. Том 1. / Н. Гринвуд, А. Эрншо. – Бином. – Москва, 2008.

34. Picone, N. Role of rare earth elements in methanol oxidation / N. Picone, H. J. M. Op den Camp // Current Opinion in Chemical Biology. – 2019. – Vol. 49. – P. 39-44.

35. Deng, Y. W. Structure and function of the lanthanide-dependent methanol dehydrogenase XoxF from the methanotroph *Methylomicrobium buryatense* 5GB1C / Y. W. Deng, S. Y. Ro, A. C. Rosenzweig // JBIC Journal of Biological Inorganic Chemistry. – 2018. – Vol. 23. – № 7. – P. 1037-1047.

36. Chu, F. XoxF Acts as the Predominant Methanol Dehydrogenase in the Type I Methanotroph *Methylomicrobium buryatense* / F. Chu, M. E. Lidstrom // Journal of Bacteriology. – 2016. – Vol. 198. – № 8. – P. 1317-1325.

37. Lanthanide-Dependent Regulation of Methanol Oxidation Systems in *Methylobacterium extorquens* AM1 and Their Contribution to Methanol Growth. / H. N. Vu, G. A. Subuyuj, S. Vijayakumar [et al.] // Journal of bacteriology. – 2016. – Vol. 198. – № 8. – P. 1250-1259.

38. Use of rare-earth elements in the phyllosphere colonizer *Methylobacterium extorquens* PA1 / A. M. Ochsner, L. Hemmerle, T. Vonderach [et al.] // Molecular Microbiology. – 2019. – Vol. 111. – № 5. – P. 1152-1166.

39. Lanthanide-Dependent Regulation of Methylotrophy in *Methylobacterium aquaticum* Strain 22A. / S. Masuda, Y. Suzuki, Y. Fujitani [et al.] // mSphere. – 2018. – Vol. 3. – № 1.

40. PQQ-dependent methanol dehydrogenases: rare-earth elements make a
Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМИ ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

difference / J. T. Keltjens, A. Pol, J. Reimann, H. J. M. Op den Camp // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2014. – Vol. 98. – № 14. – P. 6163-6183.

41. Lanthanide-dependent cross-feeding of methane-derived carbon is linked by microbial community interactions / S. M. B. Krause, T. Johnson, Y. Samadhi Karunaratne [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2017. – Vol. 114. – № 2. – P. 358-363.

42. Yu, Z. Natural Selection in Synthetic Communities Highlights the Roles of Methylococcaceae and Methylophilaceae and Suggests Differential Roles for Alternative Methanol Dehydrogenases in Methane Consumption. / Z. Yu, D. A. C. Beck, L. Chistoserdova // Frontiers in microbiology. – 2017. – Vol. 8. – P. 2392.

Оригинальность 81%