

УДК 631.811

ВЛИЯНИЕ ВНЕСЕННОГО В ПОЧВУ ЛАНТАНА НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ РАСТЕНИЙ ЯЧМЕНЯ В УСЛОВИЯХ ВЕГЕТАЦИОННОГО ОПЫТА

**© 2017 г. И. А. Фастовец^{1,2,*}, А. Д. Котельникова^{1,2},
О. Б. Рогова¹, Н. И. Сушков^{1,2}, Д. С. Волков²,
М. А. Проскурнин², Е. Б. Пашкевич²**

¹ Почвенный институт им. В. В. Докучаева,
Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2

² МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1
*e-mail: fastovetsilya@rambler.ru

В условиях вегетационного опыта с ячменем при искусственном освещении оценивали способность лантана – одного из наиболее распространенных редкоземельных элементов – накапливаться в листьях и стеблях растений и влиять на элементный состав, биомассу и содержание хлорофиллов и каротиноидов. В отдельных экспериментах изучали воздействие лантана на длину корней и coleoptилей проростков ячменя. Показано, что La^{3+} способен эффективно угнетать рост корешка при концентрации в растворе выше 10 мг/л и одновременно стимулировать рост coleoptили при концентрации выше 50 мг/л. В вегетационном опыте отмечено значимое накопление лантана в листьях и стеблях, начиная с концентрации внесенного в почву лантана 20 и 50 мг/кг соответственно, отмечено значимо большее накопление лантана листьями, чем стеблями. Обнаружено значимое уменьшение содержания хлорофиллов и каротиноидов в варианте с внесением 100 мг/кг лантана по сравнению с контролем и накопление надземной биомассы при концентрации внесенного лантана 100–200 мг/кг. Накопление биомассы, обнаруженное в вегетационном опыте, согласуется со стимулирующим влиянием лантана на удлинение coleoptили проростков, что, учитывая одновременное уменьшение длины корешка, может объясняться гормональными процессами. Полученные результаты могут быть полезны для переоценки безопасности применения редкоземельных элементов в сельском хозяйстве и для установления влияния лантана на биохимические процессы в растениях.

Ключевые слова: лантан, поглощение, биохимия, токсичность

DOI: 10.19047/0136-1694-2016-88-27-46

ВВЕДЕНИЕ

Лантан – металл из группы редкоземельных элементов, включающей 17 представителей ([Damhus et al., 2005](#)). Редкоземельные элементы традиционно подразделяют на две группы: легкие, включающая элементы с La до Eu, и тяжелые – Y и элементы от Gd до Lu ([Castor, Hedrick, 2006](#)). Некоторые исследователи выделяют третью группу – средние редкоземельные элементы – для того чтобы отделить элементы со средними атомными массами и ионными радиусами ([Foley et al., 2013](#)). Состав представителей этой группы однозначно не определен ([Tyler, 2004](#)).

Среднее содержание легких редкоземельных элементов в земной коре превышает таковое для тяжелых редкоземельных элементов. Наиболее распространенным элементом является Ce, за ним следует La. Значения кларковых чисел для La и Ce составляют 30–35 и 64–66 мг/кг соответственно ([Tyler, 2004; Castor, Hedrick, 2006](#)). Примечательно, что, несмотря на свое название, редкоземельные элементы не являются крайне редкими. Средняя концентрация Ce в земной коре сопоставима с концентрацией Cu, Zn и Pb, которые не считаются редко встречающимися. Все редкоземельные элементы, кроме Pm, намного более распространены, чем Ag или Hg, а наиболее редкие из них – Lu и Tm – встречаются чаще, чем Cd и Se ([Tyler, 2004; Castor, Hedrick, 2006; Taylor, McLennan, 1985](#)).

Основным источником редкоземельных элементов в почвах является подстилающая порода, также они поступают с органическими и минеральными удобрениями ([Hu et al., 2006b; Pang et al., 2002; Sadeghi et al., 2013; von Tucher, Schmidhalter, 2005](#)). Так, австралийские фосфорные удобрения в среднем содержат 45.2 мг/кг La и 61.0 мг/кг Ce ([Hu et al., 2006b](#)). Медианные значения концентрации La в европейских почвах составляют 14.3 и 13.6 мг/кг в пахотных и пастбищных почвах соответственно, при этом максимальная концентрация составляет 109.3 и 229.6 мг/кг ([Sadeghi et al., 2013](#)). Таким образом, значения медиан концентраций La в пахотных и пастбищных почвах Европы оказались сопоставимы, а распределение La, Ce и Y обусловлено особенностями геохимического поведения и формами нахождения этих элементов в почве ([Sadeghi et al., 2013](#)). Напротив, для почв Бразилии некоторые ав-

торы отмечали повышенное содержание редкоземельных элементов на пастбищных территориях по сравнению с пахотными, что может быть связано с выносом этих элементов растениями из пахотных почв ([Hu et al., 2006b](#)). Следовательно, несмотря на то что подвижность всех лантанидов в почве слабая, из-за показанной возможности их выноса растениями перед применением в сельском хозяйстве они должны быть тщательно изучены как с позиции влияния на почвенное плодородие, так и на их поглощение растениями ([Kabata-Pendias, 2011](#)).

Корневое поглощение и аккумуляцию La не раз демонстрировали на ячмене ([Han et al., 2005](#); [Robards, Robb, 1974](#); [Steveninck et al., 1976](#)), рисе, фасоли и кукурузе ([Liu et al., 2013](#); [Nagahashi et al., 1974](#); [von Tucher, Schmidhalter, 2005](#)). Показана способность La оказывать влияние на поглощение других ионов ([Liu et al., 2013](#); [Nagahashi et al., 1974](#)).

При поглощении корнями редкоземельные элементы преимущественно аккумулируются в них. Однако растворенные формы легких редкоземельных элементов также обладают способностью к перемещению в верхние органы растений ([Babula et al., 2008](#); [Ding et al., 2005](#); [Li et al., 1998](#); [Liang et al., 2008](#)). Кроме того, обнаружено неодинаковое распределение различных редкоземельных элементов в органах растений, обусловленное рядом факторов, таких как атомная масса элемента, вид растения, ризосферный эффект и т.д. ([Ding et al., 2005](#); [Durães et al., 2014](#); [Liang et al., 2008](#)). Например, известно, что среди всех редкоземельных элементов La лучше всего аккумулируется в стеблях пшеницы ([Ding et al., 2005](#); [Liang et al., 2008](#)).

Учитывая противоречивость современных литературных данных, не представляется возможным говорить об исключительно положительном или отрицательном влиянии La на растения ([Kabata-Pendias, 2011](#)), однако в Китае он применяется в сельском хозяйстве уже более 30 лет, наряду с другими редкоземельными элементами ([Tyler, 2004](#); [Hu et al., 2002](#); [Nicodemus et al., 2009](#)). Некоторыми авторами ([Meehan et al., 1993](#)) показано благоприятное воздействие La и Ce на рост и развитие пшеницы. Результаты исследования микроудобрений на основе редкоземельных элементов показали увеличение урожая на 10% ([Hu et al., 2002](#)). В других работах отмечено значительное ингибирующее влияние La на рост

корней кукурузы, маша ([Diatloff et al., 1995](#)) и ячменя ([Steveninck et al., 1976](#)). В зависимости от концентрации металлов наблюдалось как положительное, так и отрицательное влияние La и Ce на рост пшеницы ([Hu et al., 2002](#)). Неоднозначные результаты, обусловленные использованной дозой La, получены и при изучении лайма ([Turra et al., 2015](#)). Токсичность La может варьировать в зависимости от условий окружающей среды. Например, показано, что совместный негативный эффект La^{3+} и загрязнения кислотными дождями был сильнее отдельно взятых эффектов La^{3+} и кислотного загрязнения ([Sun et al., 2013](#)). Таким образом, существующих данных разносторонних биохимических исследований влияния La на растения в условиях хорошо контролируемого опыта оказывается недостаточно для однозначных выводов.

В настоящей работе проведена серия экспериментов для изучения влияния La на рост и биохимию растений ячменя. В задачи исследования входила оценка влияния La на рост coleoptилей и корней проростков ячменя, продукцию биомассы, содержание хлорофиллов α и β , каротиноидов, а также на элементный состав листьев и стеблей взрослых растений ячменя при выращивании их в дерново-подзолистой почве в условиях вегетационного опыта. Для проверки статистической значимости полученных результатов обработку данных производили с использованием мощных непараметрических ранговых тестов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Измерение coleoptилей и корешков у проростков. Изучение влияния La(III) на рост корней и coleoptилей производили с использованием растворов хлорида лантана (приготовленного из $\text{LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) и ацетата лантана (приготовленного из $\text{La}(\text{CH}_3\text{COO})_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$) следующей концентрации: LaCl_3 в пересчете на La^{3+} : 0 (контроль, дистиллированная вода), 10, 20, 50, 100 и 200 мг/л. Для серии с ацетатом лантана (Ac) использовали концентрацию La: 0, 10, 20, 50, 100 и 150 мг/л.

В чашки Петри, содержащие по 10 мл испытуемых растворов, помещали по 30 семян ячменя (сорт «Михайловский», селекция МСХА им. К.А. Тимирязева) и проращивали 7 дней при нормальном комнатном освещении и температуре 20–25°C, при необходимости доливая равные объемы растворов. По окончании про-

ращивания у каждого проростка измеряли длину coleoptily и самого длинного корня. Эксперимент проводили в двух повторностях. Для LaCl_3 проведено три серии эксперимента (краткое обозначение экспериментов: Cl-1, Cl-2 и Cl-3), для $\text{La}(\text{CH}_3\text{COO})_3$ – одна серия эксперимента (Ac).

Вегетационный опыт с растениями ячменя. Исследование воздействия La на взрослые растения ячменя проводили в условиях вегетационного опыта, поставленного в четырехкратной повторности. В почву вносили хлорид лантана, в пересчете на La: 0, 10, 20, 50, 100, 200 мг/кг воздушно-сухой почвы. Для обеспечения равномерного внесения La для каждого варианта концентрации 8 кг дерново-подзолистой почвы орошали раствором объемом 250 мл, содержащим соответствующее количество LaCl_3 , и добавляли 0.87 г Ca_3PO_4 . После чего почву высушивали, в каждый сосуд помещали 2 кг почвы и 10 семян ячменя. После прорастания в каждом сосуде оставляли по 6 растений. Опыт проводили в свету-установке с двумя дуговыми натриевыми лампами (ДНАТ) по 250 Вт каждая, при температуре 20–25°C в течение 40 дней. Почву для вегетационного опыта отбирали на опытном поле, расположенном в Московской области, с. Ельдигино (56°7.09' N; 37°49.10' E).

По окончании опыта надземную часть растений взвешивали, в свежих листьях определяли содержание хлорофиллов α и β по (Починок, 1976). В оставшейся зеленой массе определяли La, Ce, Nd, Al, Ba, Ca, Mg, Na, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Si, Ti, Zn, K, P методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на спектрометрах Agilent 5100 и Agilent 720-FS после кислотного разложения в системе Start D (Milestone, Италия). В почве после эксперимента определяли те же элементы. Кроме того, контролировали основные физико-химические и агрохимические показатели почв, а также содержание водорастворимых и подвижных (CaCl_2 и ААБ) форм La.

Статистическая обработка данных. Для проверки нулевой гипотезы об отсутствии систематических различий параметров между изучаемыми вариантами использовали тест Крускала–Уоллиса (K–W) ([Kruskal, Wallis, 1952](#)), модифицированный тест Гао для множественных сравнений (GaoCS) (Gao et al., 2008), модификацию теста Гао для сравнений с контролем (GaoH) ([Gao et](#)

[al., 2008](#)), а также тест на тренд Джонкхира–Терпстры ([Jonckheere, 1954; Terpstra, 1952](#)) совместно с методом последовательного исключения Людина (J–T–L) ([Lüdin, 1985](#)).

Для характеристики линейных связей использовали коэффициенты корреляции r Пирсона, значимость корреляций проверяли по t -критерию. Значимость моделей множественной линейной регрессии проверяли при помощи F -критерия, а значимость индивидуальных коэффициентов регрессии при помощи t -критерия.

Для расчетов применяли программы Statistica 12 (StatSoft, USA) и R ([Team, 2013](#)).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Модельные опыты с проростками ячменя

Влияние лантана на рост coleoptилей. Полученные данные не позволяют выявить общую тенденцию в ингибировании роста coleoptиля. Во всех четырех экспериментах тест К–W значимый, что указывает на существование различий. Множественные сравнения при помощи GaoCS в Cl-1, Cl-2 и Ac позволили выявить, что coleoptили удлиняются интенсивнее под воздействием La. Однако в варианте Ac обнаружено уменьшение длины coleoptиля при концентрации La 10 мг/л по сравнению с контролем. Наименьшая концентрация, при которой отмечалось значимое увеличение длины coleoptиля, составила 50 мг/л в эксперименте Cl-1.

Влияние лантана на рост корня. Как и с coleoptилями, при сравнении результатов измерений длин корней во всех экспериментах тесты К–W были значимыми. Во всех четырех экспериментах множественные сравнения при помощи теста GaoCS показали значимое уменьшение длины корня при концентрации La 100 мг/л и более по сравнению со всеми остальными вариантами опыта (рис. 1).

Кроме того, в экспериментах Cl-2 и Cl-3 показано, что ингибирующее действие La на рост корня наблюдается при концентрации La 20 мг/л, а в эксперименте Cl-1 этот эффект был отмечен при самой низкой концентрации La – 10 мг/л. В опыте Ac уменьшение длины корня при концентрации La меньше 100 мг/л не отмечали.

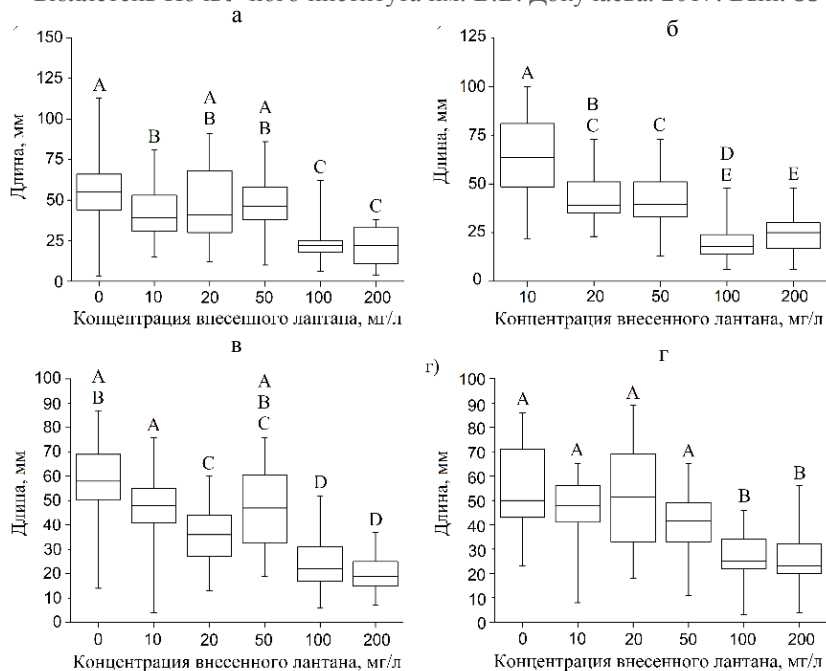


Рис. 1. Диаграммы длины корня Cl-1 (а), Cl-2 (б), Cl-3 (в) и Ac (г); вертикальными чертами обозначен размах от минимума до максимума значений; группы, в которых не встречается одна и та же буква, значительно различаются в соответствии с тестом GaoCS.

Вегетационный опыт с растениями ячменя

Влияние лантана на биомассу растений, содержание хлорофиллов и каротиноидов. Единственная значимая разница в содержании хлорофиллов α и β и каротиноидов – уменьшение их содержания в варианте концентрации 100 мг/кг по сравнению с контролем, согласно тестам GaoH и GaoCS.

Можно отметить визуальный тренд увеличения надземной биомассы с возрастанием дозы применяемого La (рис. 2). При сравнении групп с внесением La с контролем при помощи теста GaoH отмечается увеличение биомассы в варианте с содержанием La 200 мг/кг. Однако, если предположить, что биомасса изменяется монотонно по группам и применить двухсторонний J–T–L тест, то можно отметить практически значимое увеличение биомассы, начиная с 100 мг/кг La ($P = 0.062$).

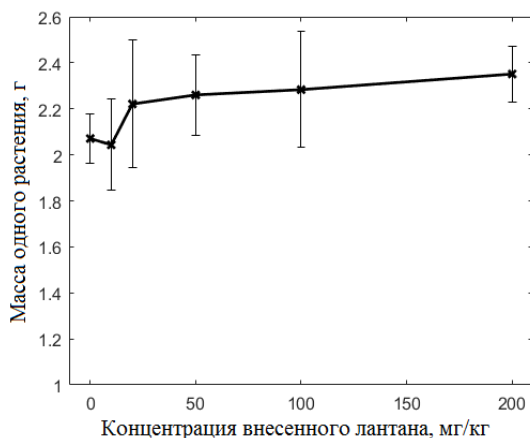


Рис. 2. Сырая надземная биомасса одного растения ячменя по группам; вертикальными чертами обозначены стандартные отклонения ($n = 4$).

Аккумуляция La(III) растениями. Аккумуляция лантана обнаружена как в листьях, так и в стеблях ячменя (рис. 3а). Согласно J–T–L, значимая аккумуляция La листьями и стеблями наблюдается уже при концентрации 20 и 50 мг/кг внесенного La соответственно.

Для разницы концентрации La в листьях и стеблях также наблюдается тенденция к увеличению с возрастанием количества внесенного в почву La (рис. 3б). Тест J–T–L показал значимый эффект, начиная с варианта опыта с внесением 50 мг/кг La, следовательно, начиная с этой концентрации и выше, листья аккумулируют значимо больше La, чем стебли.

Влияние La(III) на баланс элементов в растениях. Накопление лантана отмечено как в листьях, так и в стеблях, что объясняет наличие тесной корреляции концентрации La в почве, листьях и стеблях друг с другом ($r = 0.95–0.98$). В листьях концентрация La прямо коррелирует с концентрацией Ca ($r = 0.76$) и Mn ($r = 0.65$) и обратно с концентрацией P ($r = -0.74$) и Cu ($r = -0.52$). В стеблях обнаружена обратная корреляция La с Cu ($r = -0.59$), P ($r = -0.58$) и Fe ($r = -0.45$).

Множественная регрессионная модель типа $[La]_{\text{листья}} = \beta_0 + \beta_{Ca}[Ca]_{\text{листья}} + \beta_K[K]_{\text{листья}} + \beta_{Mg}[Mg]_{\text{листья}} + \beta_{Fe}[Fe]_{\text{листья}} + \beta_{Si}[Si]_{\text{стебли}}$, где $[X]$ – концентрация элемента, имеет R^2 0.95 и параметры, указанные в таблице.

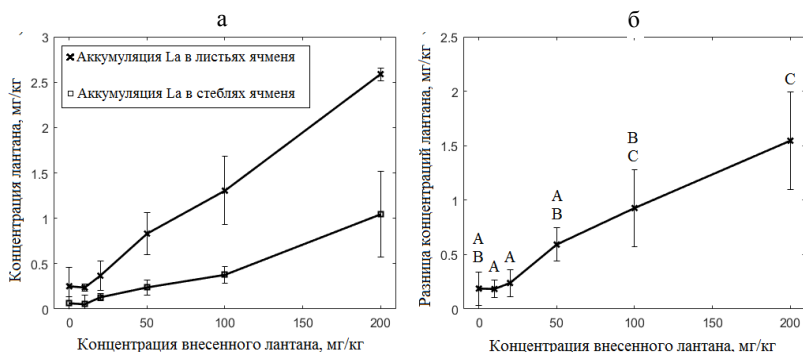


Рис. 3. Накопление La в стеблях и листьях ячменя (а) и разница между содержаниями La в листьях и стеблях по вариантам (б); вертикальными чертами показаны стандартные отклонения ($n = 4$); варианты, в обозначении которых не присутствует одна и та же буква, значительно различаются по GaoCS.

Оценки параметров β для модели множественной регрессии

Параметр	β_0	β_{Ca}	β_K	β_{Mg}	β_{Fe}	β_{Si}
	1.645	6.18×10^{-4}	-1.11×10^{-4}	-5.76×10^{-4}	-9.42×10^{-3}	1.40×10^{-3}
ДИ*	0.207, 3.083	5.20×10^{-4} , 7.16×10^{-4}	-1.90×10^{-4} , -3.3×10^{-5}	-9.86×10^{-4} , -1.66×10^{-4}	-0.0165, -2.37×10^{-3}	4.44×10^{-4} , 2.37×10^{-3}
P-значение (t)	0.028	<0.0001	0.0087	0.0091	0.012	0.0071

*95% t – доверительный интервал.

Согласно наиболее устойчивым корреляциям и модели множественной регрессии, накопление La в листьях ассоциировано с уменьшением содержания P, K, Cu, Fe и Mg и увеличением количества Ca и Mn в листьях и Si в стеблях. В стеблях схожая тенденция отмечена для P, Cu и Fe.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты работы показали, что растворимые формы La стимулировали рост coleoptilia во всех четырех экспериментах. В то же время отмечено дозозависимое ингибирование удлинения корня во всех экспериментах. При этом минимальная концентрация, при которой происходит угнетение роста корня не установлена, так как в опыте Cl-1 обнаружен ингибирующий эффект при применении самой низкой концентрации (10 мг/л). По-видимому,

ацетат лантана обладает меньшим негативным действием в отношении корней ячменя по сравнению с хлоридом лантана, так как в опыте Ас угнетение роста корней отмечали только при применении самой высокой концентрации (100 и 200 мг/л). Этот вопрос нуждается в дальнейшем изучении.

Воздействие La на рост coleoptilia изучали ранее. Например, [\(Pickard, 1970\)](#) наблюдала ингибирующее воздействие La на coleoptilia при концентрации LaCl_3 в пересчете на La выше 6.5 мг/л. При изучении проростков пшеницы La значительно замедлял рост coleoptilia при очень низкой концентрации (1.4 мг/л) после воздействия в течение 12 дней [\(d'Aquino et al., 2009\)](#). В другом исследовании с растениями львиного зева показано значительное ингибирующее действие La на скорость удлинения стеблей при концентрациях более 2780 мг/кг. При этом ингибирование удлинения стебля было дозозависимым [\(Friedman et al., 1998\)](#). С другой стороны, показано, что обработка coleoptilей овса растворами с разной концентрацией La оказывала пролонгированный стимулирующий эффект на удлинение coleoptilia после первоначального уменьшения скорости удлинения [\(Hanzely, Harmet, 1982; Harmet, 1979\)](#).

Результаты различных исследований влияния La на рост coleoptilей, проведенные в разбавленных растворах, показали, что концентрация или активность La в растворе в пределах от 0.14 до 1.4 мг/л приводила к 50% угнетению удлинения корня пшеницы, похожие результаты получены для кукурузы и маша [\(Diatloff et al., 1995\)](#). В суглинистом красноземе La в концентрации выше 500 мг/кг вызывал значимое ингибирующее действие на удлинение корешков проростков кукурузы [\(Hu et al., 2006a\)](#). В исследовании отношения между степенью растворения наночастиц La_2O_3 и их поведением в растениях огурца отмечали ингибирующий эффект наночастиц на рост корней при концентрациях более 2 мг/л за счет образования ионов La^{3+} [\(Ma et al., 2015\)](#).

Редкоземельные элементы, являясь тяжелыми металлами, при поглощении корнями накапливаются преимущественно в корнях [\(Wang et al., 2011a\)](#). Токсикологическое исследование редкоземельных элементов с растениями бобов позволило предположить, что вызванное La повреждение корней может быть связано с повышенной выработкой активных форм кислорода и активацией

изофермента эндопротеазы, что приводило к деградации окислительно-модифицированных белков и уменьшению содержания карбонильных белков при высокой концентрации La ([Wang et al., 2011b](#)). При изучении аккумуляции La в корнях горчицы показано негативное влияние на процесс роста корня при концентрации более 1 мг/л ([Xiong et al., 2006](#)). Показано, что LaCl_3 может нарушать перекисное окисление липидов, относительную активность поглощения кислорода, а также активности H^+ -АТФазы и Ca^{2+} -АТФазы в плазматических мембранах клеток корешков проростков риса при концентрации La 2.8–11.2 мг/л ([Zheng et al., 2000](#)). Существуют данные, показывающие, что La действует как антагонист Ca^{2+} каналов при концентрации ниже 0.3 мг/л ([Kobayashi et al., 2007](#)).

Имеется значительное количество данных, показавших высокую токсичность La в корнях растений. Однако встречаются работы, преимущественно китайских авторов, в которых отмечен стимулирующий эффект низких концентраций La на рост корней риса ([Fashui et al., 2003](#), [Li et al., 2007](#)), бобов ([Wang et al., 2011a](#)), мушмулы японской ([Song et al., 2002](#)) и соссюреи ([Xu et al., 2007](#)) – так называемый гормезис ([Wang et al., 2011a](#)). Очевидно, что токсичность металлов должна зависеть от изучаемых видов растений. Кроме того, необходимо принимать во внимание условия экспериментов ([Cuypers et al., 2013](#)).

Полученные нами результаты указывают на то, что взрослые растения ячменя поглощают большое количество La, который транспортируется как в стебли, так и в листья. Эти результаты частично не согласуются с другими работами ([Ding et al., 2005](#), [Liang et al., 2008](#)), где при изучении поведения La в пшенице показано его накопление преимущественно в стеблях. В вегетационном опыте в настоящей работе листья накапливали гораздо больше La, чем стебли. Так, концентрация La в листьях во варианте опыта с 200 мг/кг La составляла до 1.2% от валового содержания в почве.

Настолько значительное накопление La может объяснять негативные изменения содержания хлорофиллов и каротиноидов, обнаруженные нами. С другой стороны, накопление La в растениях может быть причиной значимого увеличения надземной растительной биомассы, обнаруженной в вариантах с внесением 100–200 мг/кг La.

Возможность La увеличивать растительную биомассу демонстрировалась во многих литературных источниках ([de Oliveira et al., 2015](#); [Fashui et al., 2003](#); [Hu et al., 2002](#); [Pang et al., 2002](#); [Song et al., 2002](#); [Turra et al., 2015](#)). При этом ряд работ, напротив, отмечает отрицательное влияние La на биомассу растений ([d'Aquino et al., 2009](#); [Hu et al., 2006a](#); [Ma et al., 2015](#); [von Tucher, Schmidhalter, 2005](#); [Xiong et al., 2006](#)). Растительная биомасса зависит от процессов, происходящих при фотосинтезе, и существуют исследования, свидетельствующие о положительном влиянии редкоземельных элементов на фотосинтез и содержание хлорофиллов ([Babula et al., 2008](#); [Fashui et al., 2003](#); [Hu et al., 2004](#)). В вегетационном опыте с соей ([de Oliveira et al., 2015](#)) показано, что La в низкой концентрации увеличивает общее содержание хлорофиллов и скорость фотосинтеза, а эти показатели, в свою очередь, ассоциированы с увеличением растительной биомассы. Однако результаты некоторых других исследований указывают на значительное уменьшение уровня содержания хлорофиллов и отношения содержания хлорофилла α к содержанию хлорофилла β , связанное с лантаном ([Liu et al., 2012](#); [Nicodemus et al., 2009](#); [Zeng et al., 2006](#)). Показано, что La может уменьшать степень разложения фотосинтетических пигментов и увеличивать отношение общего содержания хлорофиллов к содержанию каротиноидов в условиях солевого стресса ([Xu et al., 2007](#)). Таким образом, современные данные предоставляют достаточно свидетельств воздействия La на хлорофиллы и растительную биомассу, но среди них не удалось обнаружить результаты, сходные с полученными в настоящей работе, которые бы свидетельствовали об одновременном увеличении растительной биомассы и уменьшении содержания хлорофиллов.

В настоящей работе показано, что La в целом оказывает негативное влияние на баланс основных питательных элементов. Обнаруженное уменьшение концентрации P в листьях и стеблях можно объяснить связыванием фосфора с лантаном в почве ([Pang et al., 2002](#)), за счет чего уменьшается биодоступность фосфора. Ранее продемонстрировано, что этот процесс может протекать в питательных растворах ([Diatloff et al., 1995](#); [Ruiz-Herrera et al., 2012](#)). Уменьшение содержания Mg в листьях подтверждает обнаруженное уменьшение содержания хлорофиллов и предполагает отрицательное влияние на процесс фотосинтеза.

Особенно интересно, что концентрация Са и Мп в листьях стремятся к возрастанию с увеличением концентрации Ла в почве. Возможно, эти изменения связаны с нарушениями гормональной регуляции, в частности, баланса ауксинов. Так как Са играет роль вторичного мессенджера в гормональной регуляции, действие ауксинов сильно зависит от содержания Са ([Hasenstein, Evans, 1986](#)). Также существует гипотеза, согласно которой Ла влияет на рост и развитие растений через регуляцию содержания Са²⁺ в растительных клетках ([Zeng et al., 2000](#)). С другой стороны, показано, что Мп может выступать в роли кофактора во многих системах окисления индолилуксусной кислоты (ИУК), таким образом влияя на активность ИУК оксидазы ([Beffa et al., 1990](#), [Schneider, Wightman, 1974](#)). Обработка растений овса и кукурузы Мп в низкой концентрации может стимулировать удлинение coleoptiles, вызванное ИУК ([Bonner, 1949](#); [Karcz et al., 1988](#)), и этот процесс также является К-зависимым ([Cooil, 1952](#)). Не являются надежными предположения о протекающих процессах, основанные только на элементном составе. К тому же, недостаточно ясно, как именно действие Ла, как антагониста Са²⁺ каналов, связано с обнаруженными в настоящей работе изменениями, и эти проблемы нуждаются в дальнейшем изучении.

Научных работ по воздействию Ла, находящегося в почве, на баланс питательных элементов в растениях, недостаточно. Однако в вегетационном опыте с растениями сои, выращенными в вермикулитовом субстрате ([de Oliveira et al., 2015](#)), показано, что содержание Mg, Са, Р, К и Мп в корнях и побегах значимо увеличивалось в том случае, если питательный раствор содержал Ла. Напротив, накопление Си и Fe в корнях и побегах уменьшалось при воздействии увеличивающихся доз Ла. В вегетационном опыте с однолетними саженцами черного ореха (Nicodemus et al., 2009) показано, что Ла уменьшает концентрацию Mg, Са и Р в растениях при применении Ла в больших дозах (100 мг Ла на растение). В условиях эксперимента с гидропонной культурой риса (Liu et al., 2012) продемонстрировано, что небольшое добавление Ла (0.05 и 0.1 ммоль) значимо увеличило концентрацию К и Са, тогда как добавление большего количества Ла (0.5 и 1.0 ммоль) негативно повлияло на накопление К, Mg, Na, Мп и Zn в побегах. Wang et al. ([2011a](#)) провели исследование с растениями в питательных рас-

творах с концентрацией La 0, 1, 2, 4, 8 мг/л в виде $\text{La}(\text{NO}_3)_3$. Отмечено значимое увеличение содержания La в листьях, начиная с концентрации La 2 мг/л, и концентрации Mg в листьях при концентрации La 8 мг/л; незначимое уменьшение концентрации K и Fe и увеличение концентрации Mn в листьях, что соответствует результатам, полученным в настоящей работе. Однако незначимое увеличение концентрации P, Cu и Ca в листьях, показанное авторами, противоречит полученным нами результатам. Интересно, что Wang et al. описали миграцию Ca и Fe из побегов в корни, предположительно связанную с обработкой лантаном. В другом исследовании ([Wang et al., 2008](#)) растения хрена фолиарно обрабатывали растворами CeCl_3 с концентрацией Ce: 0, 20, 100, 300 мг/л. Обнаружено значительное увеличение содержания K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn во всех органах при концентрации Ce 20 мг/л, тогда как более высокая концентрация оказывала ингибирующий эффект на содержание этих элементов. Очевидно, что результаты, полученные в разных работах, сильно различаются из-за различий в условиях экспериментов. Ни в одной из работ не были получены данные, полностью согласующиеся с настоящим исследованием, поэтому существует необходимость дальнейшей проработки этих вопросов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продemonстрирована возможность La угнетать процесс удлинения корешков и одновременно усиливать рост coleoptilia проростков ячменя. В исследовании со взрослыми растениями ячменя показано, что La накапливается в больших количествах в стеблях и листьях, увеличивает надземную биомассу и вызывает биохимические изменения. Результаты внесения в почву увеличивающихся доз La включают в себя уменьшение содержания хлорофиллов и каротиноидов, а также нарушение баланса содержания питательных элементов. Впервые изучено воздействие La, внесенного в дерново-подзолистую почву, на элементный состав растений ячменя. Результаты настоящей работы могут быть полезны для дальнейшего изучения процессов, стоящих за влиянием La на продуктивность зерновых культур, а также для экотоксикологической оценки редкоземельных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/ REFERENCES

1. Pochinok Kh.N. Methods of Biochemical Analysis of Plants, Kiev: Naukova Dumka, 1976. (in russian) (*Починок Х.Н. Методы биохимического анализа растений. Киев: Наукова думка, 1976.*)
2. Tyler G. Rare earth elements in soil and plant systems – A review, *Plant Soil*, 2004, V, 267, No. 1–2, pp. 191–206.
3. Babula P., Adam V., Opatrilova R., Zehnalek J., Havel L., Kizek R. Uncommon heavy metals, metalloids and their plant toxicity: a review, *Environ. Chem. Lett.*, 2008, V. 6, No. 4, pp. 189–213.
4. Beffa R., Martin H.V., Pilet P.-E. In Vitro Oxidation of Indoleacetic Acid by Soluble Auxin-Oxidases and Peroxidases from Maize Roots, *Plant Physiology*, 1990, V. 94, No. 2, pp. 485–491.
5. Bonner J. Limiting Factors and Growth Inhibitors in the Growth of the Avena Coleoptile, *Am. J. Botany*, 1949, V. 36, No. 4, pp. 323–332.
6. Castor S.B., Hedrick J.B. *Rare earth elements, Industrial minerals: Society for mining, metallurgy, and exploration*, Littleton, Colorado, 2006, pp. 769–792.
7. Cooil B.J. Relationships of Certain Nutrients, Metabolites, and Inhibitors to Growth in the Avena Coleoptile, *Plant Physiology*, 1952, V, 27, No. 1, pp. 49–69.
8. Cuypers A., Remans T., Weyens N., Colpaert J., Vassilev A., Vangronsveld J. *Soil-Plant Relationships of Heavy Metals and Metalloids, Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*, Dordrecht: Springer Netherlands, 2013, pp. 161–193.
9. d'Aquino L., de Pinto M.C., Nardi L., Morgana M., Tommasi F. Effect of some light rare earth elements on seed germination, seedling growth and antioxidant metabolism in Triticum durum, *Chemosphere*, 2009, V. 75, No. 7, pp. 900–905.
10. Damhus T., Hartshorn R.M., Hutton A.T. *Nomenclature of inorganic chemistry: IUPAC recommendations 2005*. Royal Society of Chemistry, 2005.
11. de Oliveira C., Ramos S.J., Siqueira J.O., Faquin V., de Castro E.M., Amaral D.C., et al. Bioaccumulation and effects of lanthanum on growth and mitotic index in soybean plants, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, V. 122, pp. 136–144.
12. Diatloff E., Smith F.W., Asher C.J. Rare earth elements and plant growth: I. Effects of lanthanum and cerium on root elongation of corn and mungbean, *J. Plant Nutrition*, 1995, V. 18, No. 10, pp. 1963–1976.
13. Ding S., Liang T., Zhang C., Yan J., Zhang Z. Accumulation and fractionation of rare earth elements (REEs) in wheat: controlled by phosphate precipitation, cell wall absorption and solution complexation, *J. Experimental Botany*, 2005, V. 56, No. 420, pp. 2765–2775.

14. Durães N., Silva E.F.d., Bobos I., Ávila P. Rare Earth Elements Fractionation in Native Vegetation from the Moncorvo Iron Mines, NE Portugal, *Procedia Earth and Planetary Science*, 2014, V. 10, pp. 376–382.
15. Fashui H., Ling W., Chao L. Study of lanthanum on seed germination and growth of rice, *Biological Trace Element Research*, 2003, V. 94, No. 3, pp. 273–286.
16. Foley N.K., De Vivo B., Salminen R. Preface, *J. Geochemical Exploration*, 2013, V. 133, No. Complete, pp. 1–5.
17. Friedman H., Meir S., Rosenberger I., Halevy A.H., Kaufman P.B., Philosoph-Hadas S. Inhibition of the Gravitropic Response of Snapdragon Spikes by the Calcium-Channel Blocker Lanthanum Chloride, *Plant Physiology*, 1998, V. 118, No. 2, pp. 483–492.
18. Gao X., Alvo M., Chen J., Li G. Nonparametric multiple comparison procedures for unbalanced one-way factorial designs, *J. Statistical Planning and Inference*, 2008, V. 138, No. 8, pp. 2574–2591.
19. Han F., Shan X.-Q., Zhang J., Xie Y.-N., Pei Z.-G., Zhang S.-Z., et al. Organic acids promote the uptake of lanthanum by barley roots, *New Phytologist*, 2005, V. 165, No. 2, pp. 481–492.
20. Hanzely L., Harmet K.H. Effect of Lanthanum on Cell Wall Elongation in Avena Coleoptile Segments: Physiological and Ultrastructural Studies, *Zeitschrift für Pflanzenphysiologie*, 1982, V. 107, No. 3, pp. 223–230.
21. Harmet K.H. Rapid Growth Responses of Avena Coleoptile Segments to Lanthanum and Other Cations, *Plant Physiology*, 1979, V. 64, No. 6, pp. 1094–1098.
22. Hasenstein K.-H., Evans M.L. Calcium Dependence of Rapid Auxin Action in Maize Roots, *Plant Physiology*, 1986, V. 81, No. 2, pp. 439–443.
23. Hu X., Ding Z., Wang X., Chen Y., Dai L. Effects of Lanthanum and Cerium on the Vegetable Growth of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Seedlings, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2002, V. 69, No. 5, pp. 0727–0733.
24. Hu X., Wang X.-R., Wang C. Bioaccumulation of Lanthanum and Its Effect on Growth of Maize Seedlings in a Red Loamy Soil, *Pedosphere*, 2006a, V. 16, No. 6, pp. 799–805.
25. Hu Z., Richter H., Sparovek G., Schnug E. Physiological and Biochemical Effects of Rare Earth Elements on Plants and Their Agricultural Significance: A Review, *J. Plant Nutrition*, 2004, V. 27, No. 1, pp. 183–220.
26. Hu Z., Haneklaus S., Sparovek G., Schnug E. Rare Earth Elements in Soils, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2006b, V. 37, No. 9–10, pp. 1381–1420.
27. Jonckheere A.R. A Distribution-Free k-Sample Test Against Ordered Alternatives, *Biometrika*, 1954, V. 41, No. 1/2, pp. 133–145.
28. Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*. CRC press, 2011.

- 29.Karcz W., Stolarek J., Zientara M. Short-term effects of Mn^{2+} on elongation growth and H^{+} -extrusion in *Zea mays* L. coleoptile segments, *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 1988, V. 57, No. 3, pp. 341–348.
- 30.Kobayashi Y., Ikka T., Kimura K., Yasuda O., Koyama H. Characterisation of lanthanum toxicity for root growth of *Arabidopsis thaliana* from the aspect of natural genetic variation, *Functional Plant Biology*, 2007, V. 34, No. 11, pp. 984–994.
- 31.Kruskal W.H., Wallis W.A. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis, *J. the American Statistical Association*. 1952, V. 47, No. 260, pp. 583–621.
- 32.Li F., Shan X., Zhang T., Zhang S. Evaluation of plant availability of rare earth elements in soils by chemical fractionation and multiple regression analysis, *Environmental Pollution*, 1998, V. 102, No. № 2–3, pp. 269–277.
- 33.Li J.-Y., Jiang A.-L., Chen H.-Y., Wang Y., Zhang W. Lanthanum Prevents Salt Stress-induced Programmed Cell Death in Rice Root Tip Cells by Controlling Early Induction Events, *J. Integrative Plant Biology*, 2007, V. 49. № 7, pp. 1024–1031.
- 34.Liang T., Ding S., Song W., Chong Z., Zhang C., Li H. A review of fractionations of rare earth elements in plants, *J. Rare Earths*, 2008, V. 26, No. 1, pp. 7–15.
- 35.Liu D., Lin Y., Wang X. Effects of lanthanum on growth, element uptake, and oxidative stress in rice seedlings, *J. Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, V. 175, No. 6, pp. 907–911.
- 36.Liu D., Wang X., Zhang X., Gao Z. Effects of lanthanum on growth and accumulation in roots of rice seedlings, *Plant Soil Environ*, 2013, V. 59, No. 5, pp. 196–200.
- 37.Lüdin E. A test procedure based on ranks for the statistical evaluation of toxicological studies, *Archives of toxicology*, 1985, V. 58, No. 1, pp. 57–58.
- 38.Ma Y., Zhang P., Zhang Z., He X., Li Y., Zhang J., et al. Origin of the different phytotoxicity and biotransformation of cerium and lanthanum oxide nanoparticles in cucumber, *Nanotoxicology*, 2015, V. 9, No. 2, pp. 262–270.
- 39.Meehan B., Peverill K., Skroce A. *The impact of bioavailable rare earth elements in Australia agricultural soils, Australia soil and plant analysis. Australia: First National Workshop on Soil and Plant Analysis*, 1993, pp. 36–41.
- 40.Nagahashi G., Thomson W.W., Leonard R.T. The Casparian Strip as a Barrier to the Movement of Lanthanum in Corn Roots, *Science*, 1974, V. 183, No. 4125, pp. 670–671.
- 41.Nicodemus M.A., Salifu K.F., Jacobs D.F. Influence of lanthanum level and interactions with nitrogen source on early development of *Juglans nigra*, *J. Rare Earths*, 2009, V. 27, No. 2, pp. 270–279.

42. Pang X., Li D., Peng A. Application of rare-earth elements in the agriculture of China and its environmental behavior in soil, *Environ. Sci. Poll. Res.*, 2002, V. 9, No. 2, pp. 143.
43. Pickard B.G. Comparison of calcium and lanthanum ions in the Avena-coleoptile growth test, *Planta*, 1970, V. 91, No. 4, pp. 314–320.
44. Robards A.W., Robb M.E. The entry of ions and molecules into roots: an investigation using electron-opaque tracers, *Planta*, 1974, V. 120. № 1, pp. 1–12.
45. Ruíz-Herrera L.F., Sánchez-Calderón L., Herrera-Estrella L., López-Bucio J. Rare earth elements lanthanum and gadolinium induce phosphate-deficiency responses in Arabidopsis thaliana seedlings, *Plant Soil*, 2012, V. 353, No. 1, pp. 231–247.
46. Sadeghi M., Petrosino P., Ladenberger A., Albanese S., Andersson M., Morris G., et al. Ce, La and Y concentrations in agricultural and grazing-land soils of Europe, *J. Geochemical Exploration*, 2013, V. 133, pp. 202–213.
47. Schneider E.A., Wightman F. Metabolism of auxin in higher plants, *Annual Review of Plant Physiology*, 1974, V. 25, No. 1, pp. 487–513.
48. Song W., Hong F., Wan Z. Effects of lanthanum element on the rooting of loquat plantlet in vitro, *Biological Trace Element Research*, 2002, V. 89, No. 3, pp. 277–284.
49. Steveninck R.F.M., Steveninck M.E., Chescoe D. Intracellular binding of lanthanum in root tips of barley (*Hordeum vulgare*), *Protoplasma*, 1976, V. 90, No. 1, pp. 89–97.
50. Sun Z., Wang L., Zhou Q., Huang X. Effects and mechanisms of the combined pollution of lanthanum and acid rain on the root phenotype of soybean seedlings, *Chemosphere*, 2013, V. 93, No. 2, pp. 344–352.
51. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK, 1985.
52. Team R.C. R: A language and environment for statistical computing, 2013.
53. Terpstra T. The asymptotic normality and consistency of Kendall's test against trend, when ties are present in one ranking, *Indagationes Mathematicae*. 1952, V. 14, No. 1952, pp. 327–333.
54. Turra C., Fernandes E.A.D.N., Bacchi M.A., Adrián G., Sarriés F.B.J., Creste A.L.T., et al. Effects of Lanthanum on Citrus Plant, *Int. J. New Technol. Res.*, 2015, V. 1, No. 7, pp. 48–50.
55. von Tucher S., Schmidhalter U. Lanthanum uptake from soil and nutrient solution and its effects on plant growth, *J. Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, V. 168, No. 4, pp. 574–580.
56. Wang C., Lu X., Tian Y., Cheng T., Hu L., Chen F., et al. Lanthanum Resulted in Unbalance of Nutrient Elements and Disturbance of Cell Proliferation Cycles in *V. faba* L. Seedlings, *Biological Trace Element Research*, 2011a, V. 143, No. 2, pp. 1174–1181.

57. Wang C., He M., Shi W., Wong J., Cheng T., Wang X., et al. Toxicological effects involved in risk assessment of rare earth lanthanum on roots of *Vicia faba* L. seedlings, *J. Environmental Sciences*, 2011b, V. 23, No. 10, pp. 1721–1728.
58. Wang L., Huang X., Zhou Q. Effects of rare earth elements on the distribution of mineral elements and heavy metals in horseradish, *Chemosphere*, 2008, V. 73, No. 3, pp. 314–319.
59. Xiong S.-L., Xiong Z.-T., Chen Y.-C., Huang H. Interactive Effects of Lanthanum and Cadmium on Plant Growth and Mineral Element Uptake in Crisped-Leaf Mustard Under Hydroponic Conditions, *J. Plant Nutrition*, 2006, V. 29, No. 10, pp. 1889–1902.
60. Xu C.-M., Zhao B., Wang X.-D., Wang Y.-C. Lanthanum relieves salinity-induced oxidative stress in *Saussurea involucrata*, *Biologia Plantarum*, 2007, V. 51, No. 3, pp. 567–570.
61. Zeng F.L., Shi P., Zhang M.F., Deng R.W. Effect of lanthanum on ion absorption in cucumber seedling leaves, *Biological Trace Element Research*, 2000, V. 78, No. 1, pp. 265.
62. Zeng Q., Zhu J., Cheng H., Xie Z., Chu H. Phytotoxicity of lanthanum in rice in haplic acrisols and cambisols, *Ecotoxicology and environmental safety*, 2006, V. 64, No. 2, pp. 226–233.
63. Zheng H.-L., Zhao Z.-Q., Zhang C.-G., Feng J.-Z., Ke Z.-L., Su M.-J. Changes in lipid peroxidation, the redox system and ATPase activities in plasma membranes of rice seedling roots caused by lanthanum chloride, *Biometals*, 2000, V. 13, No. 2, pp. 157–163.

THE IMPACT OF THE IMPLEMENTED LANTHANUM ON THE CHEMICAL COMPOSITION OF BARLEY CROPS IN CONDITIONS OF VEGETATION EXPERIMENT

**I. A. Fastovets^{1,2,*}, A. D. Kotel'nikova^{1,2},
O. B. Rogova¹, N. I. Sushkov^{1,2}, D. S. Volkov²,
M. A. Proskurnin², Ye. B. Pashkevich²**

¹Dokuchaev Soil Science Institute, per. Pyzhevskii 7, Moscow, 119017 Russia

²Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: fastovetsilya@rambler.ru

In conditions of the vegetation experiment with barley under the artificial illumination, we assessed the ability of lanthanum, which is one of the most widely spread lanthanons, to accumulate in leaves and stems of plants. Also we assessed its ability to affect the elemental composition, biomass and chlo-

rophyll and carotinoides content of plants. The separate studies allowed us to investigate the impact of lanthanum on root length and coleoptiles of barley seedlings. It is shown that La^{3+} is able to depress significantly the growth of rootlet if its concentration will exceed 10 mg/l and simultaneously stimulate the growth of coleoptile at the concentration exceeding 50 mg/l. The vegetation experiment showed the significant accumulation of lanthanum in the leaves and stems beginning from the exceeding the concentration of 20 and 50 mg/kg of lanthanum within the soil. It is marked that the accumulation of lanthanum in leaves is higher than in stems. The significant decrease of the chlorophyll and carotinoides in the variant with the implementation of 100 mg/kg of lanthanum comparing to the control and the accumulation of ground biomass at the concentration of the implemented lanthanum of 100–200 mg/kg. The accumulation of biomass, which was revealed in the vegetation experiment, correlates with the stimulating impact of lanthanum on the elongation of coleoptile. Taking into account the simultaneous decrease of the root length, the elongation of coleoptile may be explained by the hormonal process. The results obtained may be useful for re-assessment of the security of the implementation of lanthanons in agriculture and the impact of lanthanum on the biochemical processes in plants.

Keywords: lanthanum, consumption, biochemistry, toxicity

Ссылки для цитирования

Фастовец И.А., Котельникова А.Д., Рогова О.Б., Волков Д.С., Проскурнин М.А., Пашкевич Е.Б. Влияние внесенного в почву лантана на химический состав растений ячменя в условиях вегетационного опыта // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 88. С. 27-46. doi: 10.19047/0136-1694-2017-88-27-46

Fastovets I.A., Kotel'nikova A.D., Rogova O.B., Sushkov N.I., Volkov D.S., Proskurnin M.A., Pashkevich Ye.B. The impact of the implemented lanthanum on the chemical composition of barley crops in conditions of vegetation experiment, *Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 2017, Vol. 88, pp. 27-46. doi: 10.19047/0136-1694-2017-88-27-46