

ГИПЕРАККУМУЛЯЦИЯ ЦЕЗИЯ РЯСКОЙ *LEMNA MINOR*

© 2019 Е.В. Платонова, А.В. Карташов, Д.В. Беляев, И.В. Карпычев

Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева Российской академии наук, г. Москва

Статья поступила в редакцию 20.09.2018

Цезий-137 является одним из наиболее распространенных радиоактивных изотопов, которые высвобождаются в окружающую среду во время ядерных аварий. Из-за относительно длительного периода полураспада, цезий-137 все еще присутствует в значительном количестве в пресных водах и почвах в районах, окружающих объекты ядерных аварий, произошедших во второй половине XX и в начале XXI столетий. Многие пресноводные организмы способны поглощать этот элемент из окружающей среды. В экспериментах с растениями, выросшими в природных условиях, было показано, что ряска *Lemna minor* является одним из наиболее эффективных аккумуляторов цезия среди высших водных растений. Для исследования накопительных способностей ряски в лабораторных условиях мы выращивали асептические растения *L. minor* на различных цезий-содержащих культуральных средах. Подобраны условия для лабораторного асептического культивирования двух штаммов ряски *L. minor*, имеющих различное происхождение: Clone ID - 0008-14-LUG (Lm-14) и RDSC Clone 5500 (Lm-55). Оценена жизнеспособность растений ряски, измерены ростовые параметры и исследована аккумуляция ими ионов цезия в широком диапазоне концентраций Cs^+ в средах культивирования в присутствии в них ионов K^+ в микромолярных или миллимолярных концентрациях. Измерены коэффициенты накопления ряской Cs^+ и исследовано влияние ионов калия на накопление Cs^+ . В асептических условиях при концентрациях K^+ , лежащих в микромолярном диапазоне, коэффициенты накопления Cs^+ составляли 200 – 400. Нами также было показано, что ряска способна накапливать цезий до уровня гипераккумуляции. Эти данные указывают на потенциальную возможность использовать ряску *L. minor* для ремедиации водоемов, загрязненных радиоактивным цезием. Полученные данные по накоплению Cs^+ в присутствии K^+ в среде в низких (мкМ) или в высоких (мМ) концентрациях указывают на конкуренцию Cs^+ и K^+ за K^+ -транспортирующие белки. Предполагается, что в поглощении Cs^+ растениями ряски могут участвовать как высокоаффинная, так и низкоаффинная системы транспорта K^+ , в зависимости от концентрации K^+ и Cs^+ в среде, в частности высокоаффинный транспортер семейства НАК и K^+ -канал шейкерного типа семейства АКТ.

Ключевые слова: *Lemna minor*, цезий, фиторемедиация, K^+ , H^+ -симпортер, гипераккумуляция.

ВВЕДЕНИЕ

Радиоактивное загрязнение – одна из актуальных проблем охраны окружающей среды в мире. Период полураспада ^{137}Cs , одного из наиболее распространённых радионуклидов-загрязнителей составляет 30,2 года, поэтому многие районы России, Белоруссии и Украины, а также некоторые районы Европы до настоящего времени, т.е. спустя тридцать два года после Чернобыльской трагедии, загрязнены цезием-137 [1].

В ряде предыдущих исследований показано, что водные организмы, включая высшие водные

Платонова Екатерина Владимировна, аспирант.
E-mail: ix.ti.andr@mail.ru

Карташов Александр Валерьевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории физиологических и молекулярных механизмов адаптации. E-mail: botanius@ya.ru

Беляев Денис Вадимович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории транспорта ионов и солеустойчивости. E-mail: bdv@ippras.ru

Карпычев Игорь Викторович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории физиологических и молекулярных механизмов адаптации. E-mail: ikarpichev@gmail.com

растения, обладают способностью накапливать радионуклиды, в том числе ^{137}Cs [2, 3, 4]. Растения-аккумуляторы и гипераккумуляторы можно использовать в фиторемедиации водоемов, загрязненных радиоактивными веществами. Растения ряски *L. minor* способны аккумулировать радиоактивный цезий более эффективно, чем многие другие пресноводные организмы [2, 5, 6].

Цезий является химическим аналогом калия, поэтому, скорее всего, он поглощается растительной клеткой через транспортеры и/или калиевые каналы. Известно, что в растениях существуют высокоаффинная и низкоаффинная системы транспорта калия. Высокоаффинная система функционирует при концентрациях калия в окружающей среде, не превышающих 0,2 мМ, при этом низкоаффинная система не активна [7]. У *Arabidopsis thaliana* высокоаффинная система транспорта калия представлена K^+ , H^+ -симпортером AtНАК5, принадлежащем к семейству KUP/НАК/KT, и калиевым каналом AtАКТ1 шейкерного типа. При низких концентрациях калия в среде (меньше 0,1 мМ) AtАКТ1 участвует в поглощении K^+ клетками, обнаруживая высокое сродство к этому иону, тогда как при концен-

трациях K^+ больше, чем 1 мМ – низкое сродство [7]. Принимая во внимание, что концентрации калия в загрязненных водоемах, заселенных ряской, обычно лежат в диапазоне 0,05 - 0,15 мМ [8], а массовая доля цезия при этом весьма незначительна по сравнению с калием, можно предположить, что поглощение радиоактивного цезия клетками в этих условиях связано с функционированием высокоаффинной транспортной системы. Именно эта система транспорта ионов калия должна быть ответственной за высокий уровень накопления радиоактивного цезия ряской *L. minor* в дикой природе.

Свойство ряски с высокой эффективностью аккумулировать радиоактивный цезий делает ее весьма перспективным кандидатом на роль фиторемедиатора водоемов для очистки их от радиоактивного цезия. В предыдущих исследованиях, посвященных аккумуляции радиоак-

тивного цезия ряской, для экспериментов брали растения, выросшие в природных условиях [2, 5]. Возможно, в природе населяющая водоемы ряска находится в симбиотических отношениях с другими организмами, которые тем или иным образом стимулируют накопление ряской цезия. Необходимы, однако, дополнительные исследования, чтобы подтвердить или опровергнуть это предположение.

В настоящей работе были подобраны условия для лабораторного асептического культивирования на средах с микромолярной концентрацией калия двух штаммов ряски *L. minor*, имеющих различное происхождение; оценена их жизнеспособность, измерены ростовые параметры и исследована аккумуляция ими ионов цезия при разных концентрациях Cs^+ в средах культивирования при низких или высоких концентрациях ионов K^+ .

Таблица 1. Среда культивирования *L. minor* с микромолярным содержанием калия (низкокалиевые среды)

Компоненты сред	Gamborg	Murashige-Skoog	Schenk-Hildebrandt	Hoagland
	Концентрации компонентов, мкМ			
NH_4NO_3	-	5156	-	-
$Ca(NO_3)_2$	12360	4514	6190	1750
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	1010	768	817	670
$(NH_4)_2HPO_4$	-	3000	987	330
$CaCl_2$	958	2822	641	-
$(NH_4)_2SO_4$	1020	-	-	33
$NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$	108	-	-	-
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	10	10	6	3,3
Na_2EDTA	10	10	6	3,3
$MnSO_4 \cdot 4H_2O$	61	100	59	10
H_3BO_3	48	100	81	50
$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	7,0	30	3,5	2,0
$Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$	1,0	1,0	0,4	-
$(NH_4)_6MoO_{24}$	-	-	-	0,08
$CoCl_2 \cdot 6H_2O$	0,1	0,1	0,5	-
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	0,1	0,1	0,8	1,5
NaI	9	5,0	6,0	-
NaCl	-	-	-	67,7

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Штаммы *L. minor*. В работе использовали два штамма асептических растений ряски *L. minor*: Clone ID - 0008-14-LUG (Lm-14) и RDSC Clone 5500 (Lm-55). Штамм (Lm-14 Луговая, Лобненский район, Московская область, Россия) был любезно предоставлен к.б.н. П.П. Пашковским (ИФР РАН). Lm-55 (Блэрни, графство Корк, Ирландия) получен из коллекции штаммов ряски RDSC (Rutgers Duckweed Stock Cooperative, Ратгерс, Нью-Джерси, США). Оба штамма проверены нами на принадлежность к виду *L. minor* путем штрихкодирования [9].

Среды и условия выращивания *L. minor*. Для культивирования ряски были использованы низкокалиевые среды, основу которых составляли среды Gamborg (B5), Murashige & Skoog (MS), Schenk & Hildebrandt (SH) и Hoagland (Таблица 1).

Концентрации калия, попадавшего в низкокалиевые среды в виде примесей с остальными компонентами, составляли не более 3-5 мкМ, в зависимости от типа среды. В качестве контроля использовали водопроводную воду, которая содержала K^+ в концентрации 7 мкМ. Калиевые среды содержали K^+ в следующих концентрациях: SH - 24 мМ, MS - 20 мМ, Hoagland - 2,7 мМ, B5 - 24,7 мМ.

В экспериментах использовали два типа стеклянных сосудов, А и Б. Сосуды А закрывались пластиковой светопропускающей крышкой и имели цилиндрическую форму (высота - 6 см, диаметр - 5 см, объем вносимой среды культивирования - 30 мл). Сосуды типа Б представляли собой закрытые алюминиевой фольгой 500 мл конические колбы с объемом вносимой среды 250 мл.

Посев ряски на среды осуществляли, высаживая в сосуды типа А по 10, а в сосуды Б по 100 случайно выбранных растений. Культуры выращивали в факторостатной камере при 16-часовом световом периоде с интенсивностью света 120 мкЕ/(м²·сек), при 22°C. Для поддержания культур растения ряски выращивали в жидкой среде SH в сосудах типа А. Инкремент роста определяли как отношение числа растений ряски в сосуде на данный день к числу растений в предыдущий день эксперимента.

Определение концентрации калия проводили, как описано в [10].

Определение концентрации цезия осуществляли, как изложено в [11].

Статистический анализ. Эксперименты проводили, по меньшей мере, в 4 повторения для каждого типа среды. Статистическую обработку данных осуществляли, используя программу Microsoft Excel. Достоверность различий определяли с использованием критерия Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ КРИТЕРИЯ

При планировании данной работы мы исходили из предположения, что ионы цезия и калия, имеющие сходные электрохимические свойства, конкурируют за K^+ -транспортирующие белки, т.е. наличие K^+ в среде должно приводить к подавлению поглощения цезия. Вместе с тем известно, что ряска обитает в водоемах, чаще всего, с низкими концентрациями K^+ [8]. В связи с этим мы выбрали условия для культивирования ряски при минимальных концентрациях K^+ в ростовых средах. Мы также выяснили, что снижение продолжительности фотопериода с 16 до 12 часов не влияло на рост растений.

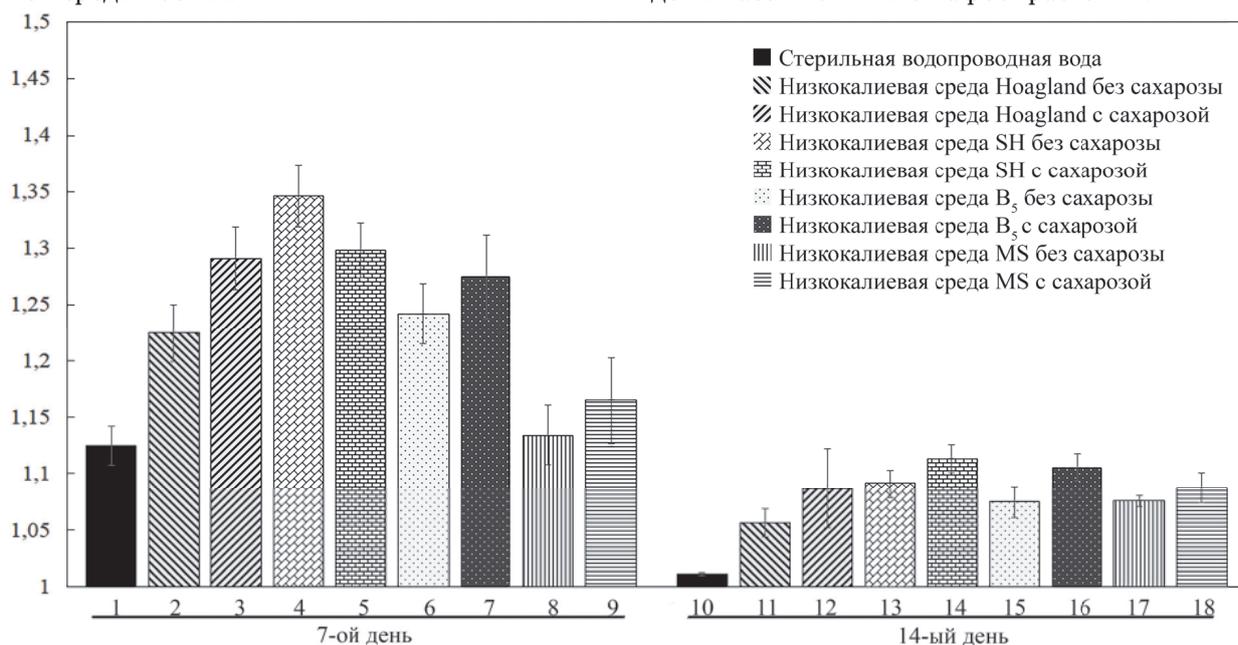


Рис. 1. Инкременты роста ряски *L. minor* (штамм Lm-55) при её культивировании на низкокалиевых средах: Hoagland, SH, MS, B5

Было проведено сравнение роста ряски на разных синтетических средах (рН ~ 4,5) в течение двух недель при наличии или отсутствии сахарозы в среде в сосудах типа А. На рис. 1 приведены инкременты роста на седьмые и четырнадцатые сутки культивирования для штамма Lm-55. Растения ряски росли на всех тестируемых средах, достигали нормальных размеров и

имели зеленую окраску. Наибольшие значения инкремента роста были получены при выращивании ряски на средах SH. Следует отметить, что величины инкремента роста ряски на всех средах, рассчитанные на седьмые сутки, были на 10 – 25% больше, чем на четырнадцатые сутки. Причиной этого, по-видимому, является ограниченный объем сред (30 мл) при исполь-

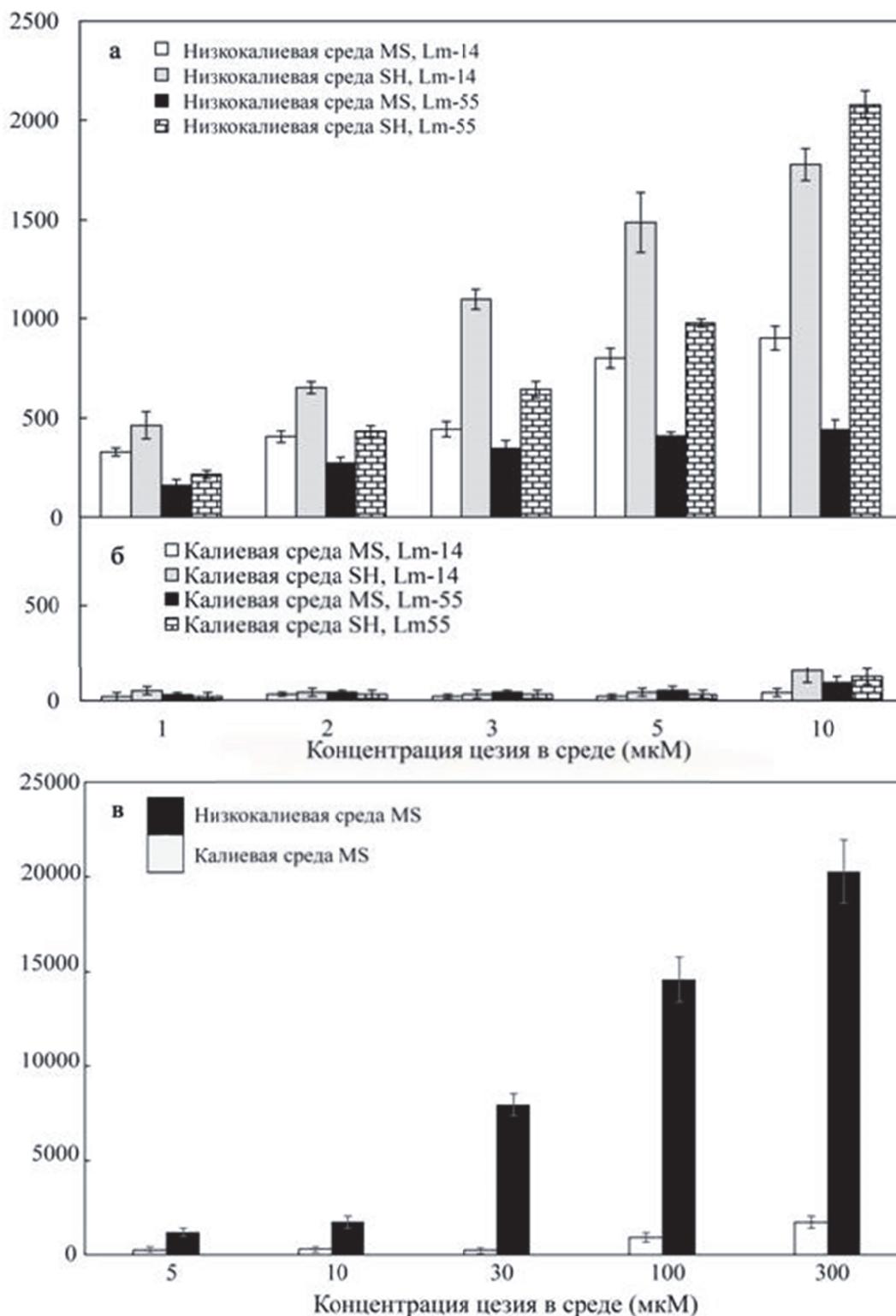


Рис. 2. Содержание Cs⁺ в растениях *L. minor* (мкмоль/кг сырой массы) при культивировании на низкокалиевых и калиевых средах, в зависимости от концентрации Cs⁺ в среде

зовании сосудов типа А, что приводит к истощению биогенных элементов в процессе роста, в первую очередь калия, который содержится в низкокалиевых средах в микроколичествах. На это указывает практически полное отсутствие K^+ в низкокалиевых средах после трехнедельного культивирования ряски в сосудах типа А. Известно, что ионы K^+ , содержащиеся в делящихся клетках, при дефиците K^+ в среде перераспределяется между дочерними клетками. В результате внутриклеточное содержание K^+ постепенно достигает некоторого минимального порогового значения, при котором дальнейшее деление клеток и рост растений становятся невозможными.

Далее мы исследовали влияние ионов K^+ в среде культивирования на содержание Cs^+ в растениях ряски (рис. 2) путем сравнения содержания Cs^+ в растениях, выращенных в низкокалиевых и калиевых средах (SH и MS) в сосудах типа А при разных концентрациях Cs^+ в культуральных средах. Данную серию экспериментов проводили на двух штаммах ряски, Lm-14 и Lm-55; растения выращивали на протяжении трех недель. Основываясь на предположении, что растения ряски для поглощения Cs^+ при низких концентрациях этого иона в среде используют высокоаффинную систему поглощения K^+ , мы сначала исследовали накопление Cs^+ растениями при концентрациях Cs^+ в среде в диапазоне от 1 до 10 мкМ (рис. 2а). По мере увеличения концентрации Cs^+ в средах его содержание в растениях обоих штаммов возрастало при культивировании растений на низкокалиевых средах как SH, так и MS типа. Присутствие калия в среде в миллимолярных концентрациях подавляло поглощение цезия в 10-50 раз. При этом растения, выращенные на средах обоих типов (как низкокалиевых, как и калиевых) были одинаково развиты. Следует отметить, что растения обоих штаммов ряски поглощали Cs^+ из низкокалиевой среды SH в 2-5 раз эффективнее, чем из низкокалиевой среды MS, что согласуется с измерениями инкремента роста, результаты которых представлены на рис. 1. При этом скорость роста растений не зависела от концентрации цезия. После трех недель культивирования цезий был почти полностью поглощен растениями из указанных сред. Следует также отметить, что растения Lm-55 накапливали цезий до значений, в 1,5 – 2 раза превышающих его содержание в растениях Lm-14. Полученные в данной серии экспериментов результаты свидетельствуют об возможном участии в поглощении цезия высокоаффинной системы транспорта калия, а именно K^+, H^+ -симпортера, гипотетического ортолога симпортера NAK5 *A. thaliana* [10].

Предполагая, что ряска для поглощения Cs^+ при миллимолярных концентрациях этого иона в среде использует низкоаффинную систему

транспорта калия, мы исследовали накопление Cs^+ растениями в более широком диапазоне его концентраций, от 1 до 10000 мкМ (рис. 2б). Было определено содержание Cs^+ в растениях Lm-14, выращивавшихся на протяжении трех недель на низкокалиевой и калиевой средах MS в сосудах типа А. Содержание Cs^+ в растениях возрастало с увеличением его концентрации в среде. При этом ряска, выращенная на калиевых средах, накапливала цезий в значительно меньших количествах (в 6-12 раз), чем ряска, выращенная на низкокалиевых средах (рис. 2б). Полученный результат свидетельствует в пользу участия низкоаффинной системы поглощения K^+ , а именно входного (inward-rectifying) калиевого канала, известного у *A. thaliana* как AKT1 [10], в поглощении ряской Cs^+ , присутствующего в среде в миллимолярных концентрациях. Необходимо отметить, что выросшие на низкокалиевых средах растения были в 1,5-2,5 раза меньше по размеру, чем растения, выросшие на калиевых средах. Уменьшение размеров, вероятно, связано с дефицитом калия. У выросших на низкокалиевых средах растений *L. minor* содержание K^+ составляло 50-100 ммоль/кг сырой массы, в то время как при выращивании на калиевых средах оно достигало 250 ммоль/кг сырой массы.

Полученные данные по накоплению Cs^+ растениями ряски ставят вопрос о токсичности этого иона и о влиянии на токсичность Cs^+ ионов калия. Была исследована выживаемость растений штамма Lm-14, выращивавшихся в сосудах типа А, на калиевых и низкокалиевых средах при концентрациях цезия в них от 0 до 10000 мкМ. Растения культивировали на указанных средах на протяжении трех недель, а затем подсчитывали число обесцвеченных (погибших) растений и число растений, имевших нормальную зеленую окраску (рис. 3).

На основании этого оценивали LC_{50} (летальную концентрацию Cs^+ , при которой погибало 50% растений). У растений ряски, выращенных на низкокалиевых средах, LC_{50} составляла величину, лежащую между 30 мкМ и 100 мкМ. Отношение числа живых к числу мертвых растений, выращенных на средах, содержащих 100 мкМ цезия, было 1:2, а при концентрации цезия в среде 500 мкМ, оно составляло 1:3. На средах с более высокими концентрациями цезия было найдено лишь по одному или по два зеленых растения. При выращивании ряски на калиевых средах (рис. 2.в), значения LC_{50} были значительно выше, достигая 2-3 мМ. Для культур, выращенных на средах, которые содержали 2 мМ цезия, отношение числа живых к числу мертвых растений составило 5:1, для 3 мМ – 1:3, а на средах, содержащих 10 мМ цезия, было найдено в среднем лишь по два зеленых растения. Таким образом, внесение калия в среду резко увеличи-

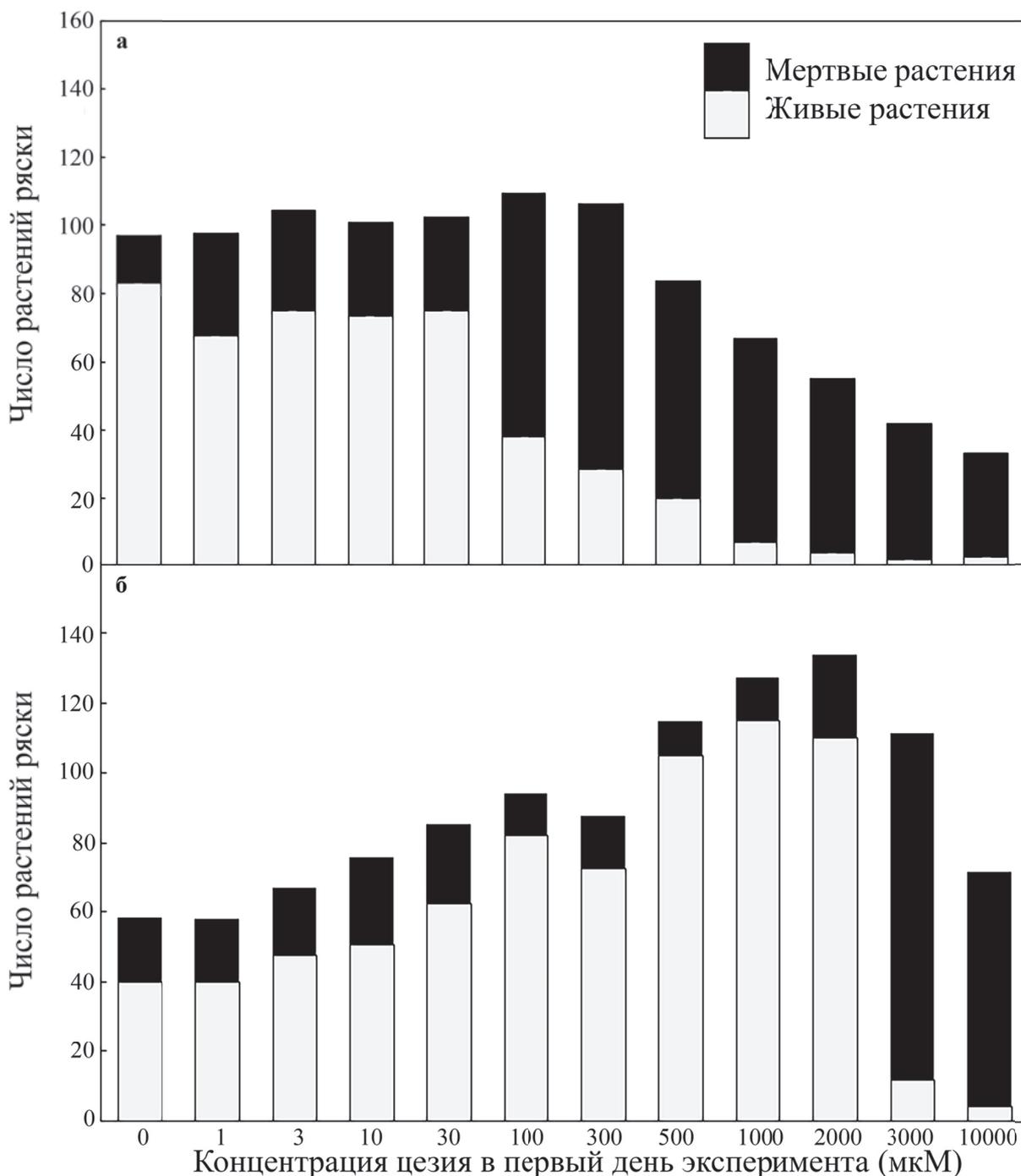


Рис. 3. Выживаемость растений ряски *L. minor* в зависимости от концентрации Cs^+ в низкокалиевых (а) и калиевых (б) средах MS

вало LC_{50} . Данное увеличение может быть связано с тем, что дополнительное количество калия, поглощенное растениями вместо цезия при росте на калиевых средах, снижает внутриклеточное содержание последнего и, соответственно, его токсичность.

Поскольку ряска *L. minor* является претендентом на роль ремедиатора водоемов, загрязненных радиоактивным цезием, представляло интерес определить коэффициенты накопления цезия (КНЦ) этим организмом. Так как концентрация калия в низкокалиевых средах при выращивании ряски в сосудах типа А к концу тре-

тью недели практически была равна нулю, для определения КНЦ мы выращивали ряску в низкокалиевых средах SH или MS в сосудах типа Б, содержащих 250 мл среды. При культивировании ряски в сосудах типа Б концентрация калия в культуральных средах практически не уменьшалась в ходе трехнедельного роста растений.

КНЦ растениями были максимальными, достигая нескольких сотен при самой низкой концентрации Cs^+ (1 мкМ), и снижались по мере увеличения концентрации Cs^+ в среде (рис. 4).

Исключение составили растения штамма Lm-55, выращивавшиеся на среде SH. У этих

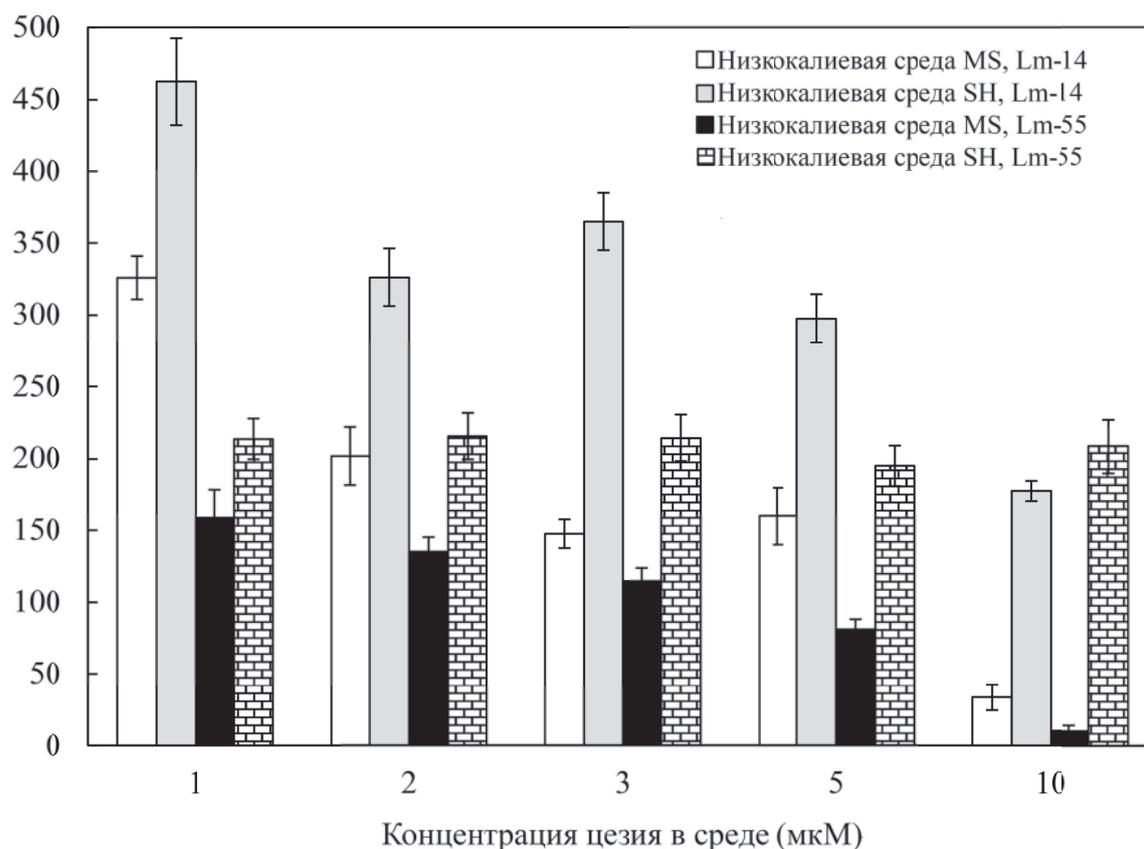


Рис. 4. Коэффициенты накопления цезия ряской *L. minor*, выращенной на низкокалиевых средах SH или MS при микромолярных концентрациях Cs⁺

растений КНЦ сохранялся на постоянном уровне во всем диапазоне концентраций Cs⁺ в среде от 1 до 10 мкМ. При всех концентрациях цезия КНЦ был заметно выше при выращивании растений на средах SH, чем на средах MS. Снижение КНЦ с увеличением концентрации Cs⁺ было более резким у MS-, чем у SH-выращенных растений. Причина различий между SH- и MS-выращенными растениями остается непонятной. Среда MS отличается от среды SH более высоким содержанием NH₄⁺ и Ca²⁺, при этом ионы аммония могут конкурировать с Cs⁺ за каналы и таким образом снижать накопление цезия растениями. Ионы кальция, которые являются модификаторами мембран, влияют как на их поверхностный заряд, так и непосредственно на активность мембранных белков, и также могут оказывать влияние на величину КНЦ. Несмотря на более высокие в целом значения КНЦ у растений Lm-14 по сравнению с растениями Lm-55, последние представляются более перспективными для фиторемедиации водоемов, поскольку могут поддерживать относительно высокие значения КНЦ независимо от концентрации Cs⁺ в среде. В пользу выбора растений Lm-55 свидетельствует также более высокий уровень накопления Cs⁺, по сравнению с Lm-14, при выращивании растений на среде SH в условиях жесткого дефицита K⁺ при концентрации Cs⁺ в районе 10 мкМ в среде (рис. 3).

КНЦ (200-400), определенные в серии экспериментов с использованием сосудов типа Б (рис. 4), были в несколько раз ниже, чем КНЦ, установленные для растений ряски в загрязненных радиоактивным цезием природных пресноводных водоемах (до 2400) [2]. Эти данные могут свидетельствовать о том, что в дополнение к предполагаемым механизмам аккумуляции цезия с использованием высокоаффинной системы транспорта калия, существует дополнительный механизм(ы), способствующий накоплению цезия ряской. Возможно, в природных водоемах ряска находится в симбиотических отношениях с микроорганизмом(ами), усиливающим ее способность аккумулировать цезий. Также нельзя исключить, что установленная нами закономерность – возрастание КНЦ с уменьшением концентрации цезия в среде (см. выше) – остается верной и при более низких концентрациях цезия (менее 1 мкМ), что может объяснить более высокие значения КНЦ, полученные ранее на растениях ряски, выросших в естественных условиях [2, 5].

Растения-гипераккумуляторы накапливают более 1000 мг тяжелого металла на 1 кг сухой массы [12]. Мы обнаружили, что ряска способна накапливать до 30000 мг цезия на 1 кг сухой массы. Таким образом, ряска может быть классифицирована как растение-гипераккумулятор цезия. Благодаря этому свойству, ряску

можно считать перспективным кандидатом для использования в качестве растения-фиторемиатора при очистке водоемов от радиоактивных изотопов цезия. Нами также показано, что ионы калия и цезия конкурируют между собой при поглощении клетками ряски. Наиболее вероятно, что вход Cs^+ в клетки осуществляется через K^+ -транспортирующие белки. В поглощении Cs^+ растениями ряски, по-видимому, могут участвовать, как высокоаффинная, так и низкоаффинная системы транспорта K^+ , в зависимости от концентрации K^+ и Cs^+ в среде, хотя в дикой природе, при поглощении K^+ и Cs^+ из пресных водоемов, активной по-видимому является только высокоаффинная система транспорта K^+ .

Последующие исследования будут включать в себя идентификацию и клонирование генов ряски *L. minor*, предположительно вовлеченных в высокоаффинный транспорт, в частности гипотетического гена семейства *НАК* (ортолога *AtНАК5*), кодирующего высокоаффинный H^+, K^+ -симпортер, и комплементацию соответствующего мутанта *A. thaliana* путем экспрессии в нем клонированного гена. Будет также выяснено, обладают ли полученные трансгенные растения повышенной способностью к накоплению цезия по сравнению с растениями дикого типа.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим к.б.н. Галину Николаевну Ралдугину за полезные дискуссии и замечания во время подготовки этой рукописи, а также к.б.н Павла Павловича Пашковского за предоставление штамма ряски Clone ID - 0008-14-LUG (Lm-14).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Израэль Ю. А., Богдевич И. М. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси Москва-Минск: фонд «Инфосфера»-НИА-Природа, 2009.
2. К вопросу о коэффициенте накопления для радиоизотопов стронция, рутения, цезия и церия пресноводными организмами / Е.А.Тимофеева-Ресовская, Н.В.Тимофеев-Ресовский, А.Б. Герцова, Е.А. Гилева, Т.В. Шарова, Г.М. Кулилова, Г.А. Милютин // Зоол. Ж., 1960, том. 39, вып. 10, С. 1449-1453.
3. Тимофеева-Ресовская Е.А., Тимофеев-Ресовский Н.В., Гилева Э.А. О специфических накопителях отдельных радиоизотопов среди пресноводных организмов // Доклады Академии наук СССР, 1961, том 140, вып. 6, С. 1437-1440.
4. Global searches for microalgae and aquatic plants that can eliminate radioactive cesium, iodine and strontium from the radio-polluted aquatic environment: a bioremediation strategy / S. Fukuda, K. Iwamoto, M. Atsumi, A. Yokoyama, T. Nakayama, K. Ishida, I. Inouye, Y. Shiraiwa // J Plant Res, 2014, vol. 27, no. 1, pp. 79–89.
5. Тимофеева-Ресовская Е.А. и Тимофеев-Ресовский Н.В. О влиянии этилендиаминтетраацетата (ЭДТА) на коэффициенты накопления различных радиоактивных изотопов из водного раствора пресноводными растениями // Доклады Академии наук СССР, 1960, том 130, вып. 1, С. 210-213.
6. Иванов В.И., Тимофеева-Ресовская Е.А., Тимофеев-Ресовский Н.В. О накоплении цезия пресноводными растениями // Труды института биологии. Проблемы радиационной биогеоценологии, Свердловск, 1965, вып. 45, С. 33-39.
7. Phosphorylation of ARF2 relieves its repression of transcription of the K^+ transporter gene *НАК5* in response to low potassium stress / Shuai Zhao, Meiling Zhang, Tian-Li Ma, Yi Wang // The Plant Cell, 2016, vol. 28, P. 3005-3019
8. Бакунов Н.А., Саватюгин Л.М. К вопросу устойчивости пресноводных водоемов Восточной Фенноскандии к отложению ^{137}Cs радиологический аспект // Арктика: экология и экономика, 2015, вып. 1(9), С. 24-35
9. DNA barcoding of the Lemnaceae, a family of aquatic monocots / W. Wang, Y. Wu, Y. Yan, M. Ermakova, R. Kerstetter, J. Messing // BMC Plant Biology 2010, 10:205.
10. Вклад неорганических ионов, растворимых углеводов и многоатомных спиртов в поддержании водного гомеостаза у двух видов полыни в условиях засоления / Ю. В. Орлова, Н.А. Мясогедов, Е.Б. Кириченко, Ю.В. Балнокин // Физиология растений, 2009, том 56 №2, С. 220-231.
11. Effects of copper deficiency and copper toxicity on organogenesis and some physiological and biochemical responses of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings grown in hydroculture / Yu. V. Ivanov, A. V. Kartashov, A. I. Ivanova, Y. V. Savochkin, V. V. Kuznetsov // Environ Sci Pollut Res, 2016, 23(17) P. 17332–17344. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6929-1> (дата обращения 25.08.2018).
12. Тумов А. Ф., Таланова В. В., Казнина Н.М. Физиологические основы устойчивости растений к тяжелым металлам (учебное пособие). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2011.

HYPERACCUMULATION OF CESIUM BY DUCKWEED *LEMNA MINOR*

© 2019 Y.V. Platonova, A.V. Kartashov, D.V. Beliaev and I.V. Karpichev

K.A. Timiryazev Institute of Plant Physiology RAS, Moscow

Cesium-137 is one of the most common radioactive isotopes that are released into the environment during nuclear accidents. Because of the relatively long half-life time, cesium-137 is still present in significant amounts in fresh waters and soils in the areas surrounding nuclear accident sites that occurred in the second half of the 20th and early 21st centuries. Many freshwater organisms have the ability to absorb cesium from the environment. It has been shown in experiments with the *Lemna minor* plants grown in the wild that this duckweed is one of the most efficient cesium accumulators among higher aquatic plants. In order to study duckweed accumulation capacities under the laboratory conditions, we grew aseptic *L. minor* plants on various cesium-containing culture media. The conditions for laboratory aseptic cultivation of two *L. minor* strains of different origin (Clone ID - 0008-14-LUG (Lm-14) and RDSC Clone 5500 (Lm-55)) were optimized. The accumulation of cesium ions by *L. minor* plants in a wide range of Cs⁺ concentrations in culture media in the presence of K⁺ ions in both low (mM) and high (mM) concentrations was studied. We also evaluated the viability of duckweed plants and measured the growth parameters of the plants under these growth conditions. The coefficients of Cs⁺ accumulation were determined and the effect of potassium ions on the accumulation of Cs⁺ was investigated. In aseptic conditions at micromolar K⁺ concentrations, the accumulation coefficients of Cs⁺ were found to be from 200 to 400. We also have shown that *L. minor* is able to accumulate cesium ions to the hyperaccumulation levels. These findings indicate a potential use of *L. minor* plants for remediation of water bodies contaminated with radioactive cesium. Our data on Cs⁺ accumulation in the presence of K⁺ both in low and high concentrations in the culture media also show that there is a competition between Cs⁺ and K⁺ ions for K⁺-transporting proteins. We suggested that both the high affinity and the low affinity K⁺ transport systems may participate in the Cs⁺ absorption by duckweed plants, depending on the K⁺ and Cs⁺ concentrations in the medium, in particular a high affinity transporter of the HAK family or a K⁺-channel of the AKT shaker family.

Keywords: *Lemna minor*, cesium, phytoremediation, K⁺, H⁺-symporter, hyperaccumulation.

Ekaterina Platonova, Graduate Student.

E-mail: ix.ti.andr@mail.ru

Alexander Kartashov, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Physiological and Molecular Adaptation Mechanisms.

E-mail: botanius@ya.ru

Denis Beliaev, Ph.D in Plant Molecular and Cellular Biology, Senior Researcher, Laboratory of Ion Transport and Salt Resistance. E-mail: bdv@ippras.ru

Igor Karpichev, Ph.D. in Molecular Biology, Senior Researcher at the Laboratory of Physiological and Molecular Adaptation Mechanisms. E-mail: ikarpichev@gmail.com