

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 631.81
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2020-65-2-229-238>

Поступила в редакцию 10.05.2019
Received 10.05.2019

**А. Н. Никитин, О. А. Шуранкова, И. А. Чешик, Г. А. Леферд, Е. В. Мищенко,
Е. В. Жуковская, Д. В. Сухарева**

Институт радиобиологии НАН Беларуси, Гомель, Республика Беларусь

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА УВЛАЖНЕНИЯ ПОЧВЫ НА НАКОПЛЕНИЕ ¹³⁷Cs ПОБЕГАМИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ

Аннотация. Изучено влияние режима увлажнения почвы на интенсивность перехода ¹³⁷Cs в злаковые растения на примере пшеницы яровой. В условиях фитокомнаты с регулируемым климатом выполнен анализ накопления ¹³⁷Cs в побегах пшеницы яровой при режимах увлажнения почвы 40 % (недостаточная влагообеспеченность), 70 % (оптимальная влагообеспеченность) и 85 % (избыточная влагообеспеченность) от полной влагоемкости почвы на почвенных субстратах с оптимальным и низким содержанием основных минеральных элементов питания. По результатам вегетационного эксперимента показано, что увеличение влажности почвы от 40 до 85 % от полной влагоемкости существенно снижает содержание ¹³⁷Cs в побегах. Характер зависимости между увлажнением и накоплением ¹³⁷Cs надземными органами растений определяется агрохимическими особенностями почвы. На субстрате с оптимальным содержанием минеральных элементов питания разница в накоплении радионуклида надземными органами пшеницы между крайними по влагообеспеченности вариантами достигает четырехкратных значений, на субстрате с низким содержанием основных элементов питания – двукратных, при этом различия при влагообеспеченности 70 и 85 % отсутствуют. Выявленные зависимости не могут быть объяснены изменением содержания биодоступных форм ¹³⁷Cs в почве, поскольку данный показатель существенно не изменяется при различных режимах увлажнения.

Ключевые слова: цезий-137, пшеница, почва, водный режим, коэффициент накопления

Для цитирования: Экспериментальная оценка влияния режима увлажнения почвы на накопление ¹³⁷Cs побегами яровой пшеницы / А. Н. Никитин [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2020. – Т. 65, № 2. – С. 229–238. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2020-65-2-229-238>

**Aleksander N. Nikitin, Olga A. Shurankova, Ihar A. Chesnyk, Halina A. Leferd, Yahor V. Mishchenko,
Evgenia V. Zhukovskaya, Diana V. Sukhareva**

Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF INFLUENCE OF SOIL MOISTURE ON THE ¹³⁷Cs ACCUMULATION IN SHOOTS OF SPRING WHEAT

Abstract. The aim of this research was to analyze the effect of soil moisture regime on the intensity of ¹³⁷Cs transfer into cereals using spring wheat as a model species. Accumulation of ¹³⁷Cs in shoots of spring wheat grown on soil substrates differ by water and nutrients content was analyzed. The investigated water regimes were 40 % (insufficient moisture supply), 70 % (optimal moisture supply) and 85 % (excessive moisture supply) of full moisture capacity of the soils; substrates with optimal and low content of essential mineral nutrients were used in the experiment. The plants were grown in a chamber with controlled climate conditions. Increasing water content in the soil from 40 to 85 % of the total moisture capacity significantly reduces the ¹³⁷Cs content in plants. The shape of the relationship between soil moisture and the soil-to-plant transfer of ¹³⁷Cs depends on the agrochemical characteristics of the soil. The difference in the radioisotope accumulation in the shoots of wheat grown on extreme water regimes is about four times when substrate with optimum content of nutrients was used. The difference is less than two times when substrate with a low content of essential nutrients was used; moreover, there are no differences between the 70 and 85 % variants on a substrate with low content of nutrients. The revealed dependencies cannot be explained by the change in the share of bioavailable forms of ¹³⁷Cs in the soil since it does not significantly change in soils with different moisture regimes.

Keywords: cesium-137, wheat, soil, water regime, soil-to-plant transfer factor

For citation: Nikitin A. N., Shurankova O. A., Chesnyk I. A., Leferd H. A., Mishchenko Ya. V., Zhukovskaya E. V., Sukhareva D. V. Experimental assessment of influence of soil moisture on the ¹³⁷Cs accumulation in shoots of spring wheat. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2020, vol. 65, no. 2, pp. 229–238 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2020-65-2-229-238>

Введение. Климатические условия на Земле в целом и в отдельных ее регионах, в частности в Республике Беларусь, претерпевают направленные изменения. На территории Беларуси наблюдаются значительное повышение температуры в холодные сезоны года, увеличение испаряемости при сохранении и даже при снижении количества атмосферных осадков в теплый период года, более частые засухи при одновременном увеличении интенсивности экстремальных (ливневых) осадков [1]. Отмечается смещение агроклиматических областей на 60–150 км к северу. Полесье в настоящее время представляет собой более теплую и аридную агроклиматическую зону.

Вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС значительная часть территории Республики Беларусь загрязнена техногенными радионуклидами. Среди них основным дозообразующим является изотоп ^{137}Cs . Вопрос о том, как отклонения погодно-климатических условий от многолетней нормы влияют на биологическую доступность радионуклидов, изучен крайне недостаточно. М. Dowdall с соавт. [2] указывают на имеющуюся неопределенность в характере изменения коэффициентов накопления радионуклидов растениями при прогнозируемых трендах изменения климата, отмечая при этом необходимость детального изучения данного вопроса, так как поведение радионуклидов в системе почва–растения является ключевым элементом в формировании доз внутреннего облучения человека.

Интенсивность перехода из почвы в растения радиоактивных изотопов щелочных и щелочно-земельных металлов во многом зависит от их распределения в почве, на что в свою очередь оказывают влияние такие факторы, как состав материнской породы и характер ее выветривания, водный режим, ионная сила почвенных растворов, количественные и качественные характеристики органического вещества, pH и окислительно-восстановительный потенциал. Эти показатели прямо или опосредованно изменяются при трансформации водного и теплового режимов территории.

Накопленные к настоящему времени сведения по влиянию влажности почвы на поступление радионуклидов в растения неоднозначны. Это связано со сложным характером взаимовлияния влажности, свойств почвы и биологических особенностей растений на процессы миграции радионуклидов в системе почва–растения. Миграция радиоактивных изотопов в почвах в значительной степени связана с перемещением водных растворов, способствующих гидролизу, выщелачиванию, горизонтальному и вертикальному перемещению химических элементов. В свою очередь водный режим влияет на физико-химическое состояние радионуклидов, их способность переходить в раствор и мигрировать по профилю почв. От влажности почвы зависят и процессы жизнедеятельности растений, в том числе поглощение корневыми системами элементов минерального питания [3, 4].

В серии лабораторных экспериментов изучено распределение ряда техногенных радионуклидов в равновесной системе почва–раствор при изменении в широких пределах соотношений твердой и жидкой фаз почвы. Результаты эксперимента показали, что повышение обводненности почв приводит к увеличению содержания всех радионуклидов в жидкой фазе. При крайних значениях коэффициентов обводненности показатели содержания растворенных форм цезия различаются в 150–200 раз, стронция – в 3–9 [5].

В ряде наблюдений показано, что с увеличением влажности почвы увеличивается доля обменного ^{137}Cs , поэтому возрастают коэффициенты перехода и содержание этого радионуклида в растениях. Установлено, что переход радиоцезия в многолетние травы на гидроморфных дерново-глеевых и дерново-подзолисто-глеевых почвах в 10–27 раз выше, чем на автоморфных и временно избыточно-увлажняемых разновидностях этих почв [6].

В кратковременном эксперименте S. Ehlken и G. Kirchner [7] показано, что поступление радионуклидов к корням происходит преимущественно с массами воды, а уменьшение содержания воды в почве приводит к снижению поступления цезия в растения.

Более сложные изменения в направленности и интенсивности миграции радионуклидов в системе почва–растения в естественных условиях связаны с водным режимом почвы. Так, по результатам трехлетнего полевого эксперимента [7], недостаток воды изменил морфологию и физиологию корней, а накопление ^{90}Sr и ^{137}Cs в пастбищной растительности не зависело от влажности почвы. В то же время исследование миграционной способности основных дозообразующих

радионуклидов чернобыльских эмиссий, проведенное белорусскими радиоэкологами в природно-растительном комплексе зоны отчуждения в условиях пойменного луга с доминированием в травостое злака-оксилomezогрофита вейника незамечаемого (*Calamagrostis neglecta* Ehrh.), показало устойчивую тенденцию к повышению биологической подвижности радионуклидов цезия и стронция на самых увлажненных участках луга, затопляемых в весенний период [8]. При двукратном повышении уровня влажности в аккумулятивном горизонте почвы коэффициенты перехода ^{90}Sr в побеги возрастали почти в 2 раза, ^{137}Cs – в 6,5 раза.

Результаты специальных вегетационных опытов с искусственным поддержанием влажности почвы на уровне 80, 50 и 25 % от полной влагоемкости (ПВ) показали, что значения коэффициентов накопления определяются как химическими свойствами радиоактивных элементов, так и биологическими особенностями растений и очень незначительно варьируются по каждому нуклиду в зависимости от влажности почв [9]. В серии параллельных лабораторных опытов с системой почва–раствор было показано, что при относительно низкой обводненности, соответствующей показателям влажности при вегетационных опытах, концентрация ^{137}Cs в жидкой фазе существенно не меняется, что может объяснять слабую вариабельность коэффициентов накопления цезия растениями.

Цель настоящей работы – анализ влияния режима увлажнения почвы на накопление ^{137}Cs в надземной части злаковых растений для подтверждения научной гипотезы о том, что снижение содержания влаги в почве уменьшает биологическую доступность ^{137}Cs за счет его перераспределения в пользу форм, связанных с минеральными компонентами почвы, и сопровождается ослаблением корневого поглощения и поступления радионуклида в надземные органы растений, а повышение уровня увлажнения почвы, наоборот, приводит к возрастанию биологической доступности цезия.

Объекты и методы исследования. Объектом исследований служили растения яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Рассвет, категория РС, репродукция 1, и почва, отобранная в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС. Субстраты для выращивания растений формировали из верхних слоев (0–10, 0–15 см) дерново-перегнойно-глеевой суглинистой почвы, отобранной в бывшем населенном пункте (б. н. п.) Борщевка (субстрат 1), и дерново-подзолистой супесчаной почвы, отобранной в окрестности б. н. п. Масаны (субстрат 2). Удельная активность субстрата 1 по ^{137}Cs составляла 10,0 кБк/кг, субстрата 2 – 7,3 кБк/кг.

Анализ почв при выполнении вегетационных опытов показал, что субстраты 1 и 2 существенно различаются по водно-физическим и агрохимическим характеристикам (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Водно-физические и агрохимические свойства почвы при выполнении вегетационных опытов
T a b l e 1. Water-physical and agrochemical characteristics of soil in the vegetative experiments

Показатель	Субстрат 1	Субстрат 2	Погрешность метода
pH (в KCl), ед.	6,7	4,4	0,2 ед.
Ca (обменный), мг/кг	2148–2461	251	7,5 %
Mg (обменный), мг/кг	133,8–228,6	34,2	7,5 %
P ₂ O ₅ , мг/кг	1818–3245	142	15 %
Гумус, %	4,54–6,33	1,28	20 %
K ₂ O (подвижный по Кирсанову), мг/кг	224–372	41	10–20 %
Общее к-во поглощенных оснований, мМ/100 г	57,2–69,2	2,2	10 %
Гидролитическая кислотность, мМ/100 г	0,89–1,03	2,62	12 %
Емкость поглощения, мМ/100 г	60,95–68,89	4,82	–
Степень насыщенности основаниями, %	98,3–98,7	45,6	–
Полная влагоемкость почвы, мл/кг	593,0	293,3	7,5 %
Удельная активность ^{137}Cs , кБк/кг	10,0	7,7	10 %

Определение агрохимических показателей в почвенных образцах проводили согласно стандартным методикам: pH – по ГОСТ 26483-85, гидролитической кислотности – по ГОСТ 26212-91, общего количества поглощенных оснований – по ГОСТ 27821-88, содержания гумуса – по ГОСТ 26213-91, обменного кальция и магния – по ГОСТ 26487-85, подвижного фосфора –

по ГОСТ 26207-91, калия водорастворимого – по ГОСТ 27753.6-88, калия подвижного – по методу Кирсанова согласно ГОСТ 26207-91, ГОСТ 27753.6-91. Для расчета и поддержания режима увлажнения почвы в экспериментах определяли ее полную влагоемкость [10].

В субстрате 1 показатели плодородия почвы превышали показатели в субстрате 2: по содержанию органического вещества – в 4 раза; подвижного фосфора, обменных форм калия, кальция и магния – в 7–9 раз; по емкости поглощения – в 12 раз; по степени насыщенности основаниями – в 2 раза. Реакция среды субстрата 1 близка к нейтральной ($\text{pH}_{\text{КСЛ}} 6,7$), субстрата 2 – среднекислая ($\text{pH}_{\text{КСЛ}} 4,4$).

Перед помещением субстратов в пластиковые контейнеры для выращивания растений почву тщательно перемешивали и увлажняли дистиллированной водой для достижения уровня влажности, равного 40 % от ПВ. После заполнения контейнеров объемом 1,1 л почвой в нее вносили, согласно схеме опытов, дополнительный объем дистиллированной воды для создания в субстратах уровней влажности 40, 70 и 85 % от ПВ. В ходе эксперимента каждые 2–3 сут весовым методом определяли потерю воды, обусловленную ее испарением с поверхности субстрата и в процессе транспирации растений, а затем восполняли потерянный объем дистиллированной водой. Опыты с увлажнением каждого субстрата проводили в трехкратной повторности.

Семена пшеницы проращивали при температуре 18 °С. Наклюнувшиеся семена в количестве 20 штук высевали по трафарету в контейнеры на глубину 1 см.

Экспериментальные исследования проводили в фитокамере с регулируемым климатом. Растения выращивали при температуре воздуха 18 °С и относительной влажности воздуха 50–60 %. Продолжительность светового дня составляла 16 ч, включая 30 мин на постепенное увеличение и ослабление светового потока. Поток фотосинтетически активной радиации на максимуме составлял $100 \text{ мМ} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$.

На 41-е сутки вегетации растения срезали и взвешивали. Затем надземную фитомассу высушивали до воздушно-сухого состояния, повторно взвешивали и измельчали в блендере до порошкообразного состояния. Навеску образца почвы после завершения эксперимента высушивали до воздушно-сухого состояния, просеивали через сито (размер ячейки 2 мм) и помещали в счетную мишень для гамма-спектрометрических измерений с геометрией «дента» (0,1 л).

Удельную активность образцов растений и почвы по ^{137}Cs измеряли в соответствии с принятыми методическими рекомендациями, используя гамма-спектрометрический комплекс производства CANBERRA Packard (США) с коаксиальным полупроводниковым детектором GX2018. Спектрометрическую информацию обрабатывали с помощью пакета программ Genie 2000. Относительная погрешность при измерении удельной активности ^{137}Cs в пробах составляла от 5 до 10 % в зависимости от активности образца. Минимально детектируемая активность ^{137}Cs за время измерения 1 ч – 3 Бк в используемой счетной мишени объемом 0,1 л. Для определения поступления ^{137}Cs в растения рассчитывали коэффициент накопления радионуклида – отношение удельной активности ^{137}Cs в надземных органах растения (образцы в абсолютно сухом состоянии) к его удельной активности в почве (образцы в воздушно-сухом состоянии).

Для определения содержания в почве биологически доступного ^{137}Cs (растворенная и обменная формы) радионуклид извлекали из навески почвы массой 10 г (в пересчете на абсолютно сухой вес), используя 1 М раствор ацетата аммония. Активность ^{137}Cs в вытяжке определяли гамма-спектрометрическим методом, применяя счетную мишень геометрии Маринелли.

Для обработки полученных результатов использовали приложение StatSoft Statistica 6.0. Основными статистическими характеристиками служили: среднее арифметическое, среднее квадратичное отклонение, ошибка средней величины. Достоверность различий между средними величинами определяли с помощью *t*-критерия Стьюдента при уровне значимости 0,05.

Результаты исследования. В ходе изучения особенностей влияния водного режима почвы на миграционную способность радионуклидов ^{137}Cs в системе почва–надземная фитомасса опытных растений на контрастных по агрохимическим характеристикам субстратах при содержании воды 40–85 % от ПВ было установлено, что уровни плодородия и содержания биогенных элементов минерального питания в почве оказали более существенное, чем водный режим, воздействие на биологическую продуктивность растений и накопление в них радионуклидов цезия.

Показатели продуктивности и развития растений на оптимальном агрофоне субстрата 1 в 2 раза превышали показатели растений на субстрате 2, характеризующемся низким уровнем плодородия и кислой (pH_{KCl} 4,4) реакцией среды (табл. 2, рис. 1).

Таблица 2. Биологическая продуктивность побегов яровой пшеницы, абс. сух. вес

Table 2. Biological productivity of the shoots of spring wheat, absolutely dry weight

Влажность субстрата, % от полной влагоемкости	Субстрат 1			Субстрат 2		
	Фитомасса, г/контейнер	Прибавка, %	Абс. сух. вещество, %	Фитомасса, г/контейнер	Прибавка, %	Абс. сух. вещество, %
40	2,35 ± 0,10	-23,0	15,1 ± 0,7	1,30 ± 0,01	-7	20,7 ± 2,4
70	3,05 ± 0,30	-	16,8 ± 1,6	1,40 ± 0,11	-	22,0 ± 2,3
85	3,25 ± 0,21	+6,6	17,0 ± 3,7	1,43 ± 0,14	+2	22,3 ± 1,9

Принимая для обоих субстратов влажность 70 % от ПВ в заданном диапазоне уровней увлажнения за условный оптимум, следует отметить, что понижение влажности до 40 % от ПВ достоверно отразилось на продуктивности надземных органов пшеницы только на субстрате 1, где биологическая продуктивность растений снизилась на 23 % относительно показателей варианта с условно оптимальным увлажнением. Повышение влажности до 85 % от ПВ на субстрате 1, так же как и изменение влажности в диапазоне 40–85 % от ПВ на субстрате 2, существенно не повлияло на развитие и фитомассу растений.

На субстрате 1 содержание сухого вещества в надземных органах растений пшеницы в варианте 40 % от ПВ оказалось минимальным, в вариантах с 70 и 85 % от ПВ наблюдалось незначительное его увеличение. На субстрате 2 различия в содержании сухого вещества в надземных органах между вариантами с заданными уровнями увлажнения практически отсутствовали. В данных условиях дефицит макроэлементов явился основным лимитирующим фактором, поэтому недостаточное или избыточное количество воды практически не отразилось на параметрах надземной фитомассы.

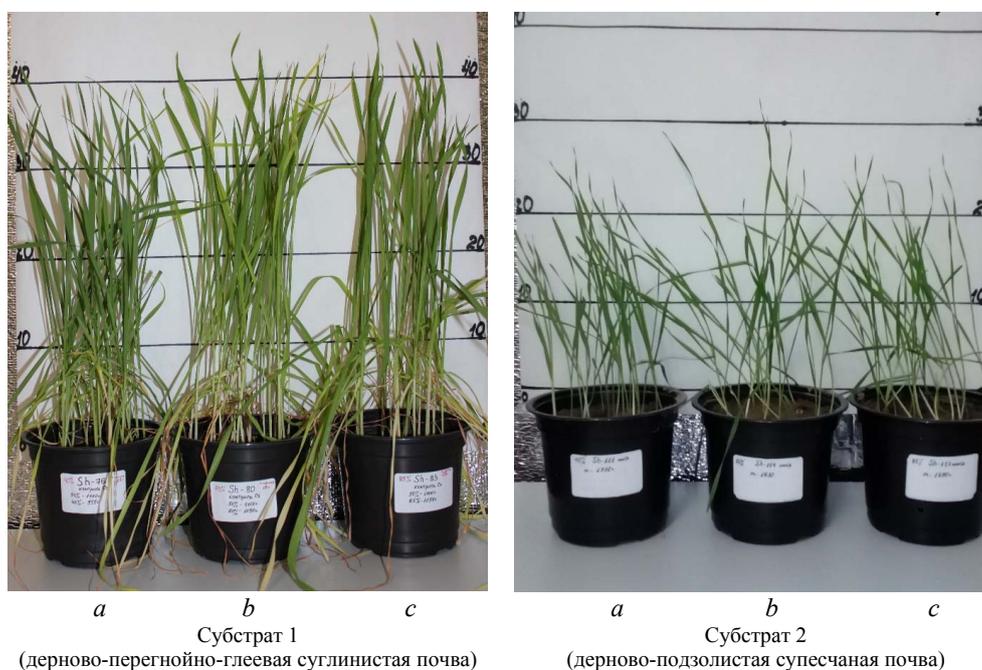


Рис. 1. Растения яровой пшеницы на 41-е сутки культивирования в условиях оптимального (субстрат 1) и низкого (субстрат 2) агрофонов при различных уровнях влагообеспеченности почвы: a – 40 %, b – 70 %, c – 85 % от полной влагоемкости

Fig. 1. The 41-day old winter wheat plants cultivated in optimal (substrate 1) and low (substrate 2) fertility of soil with water content: a – 40 %, b – 70 %, c – 85 % of full moisture capacity

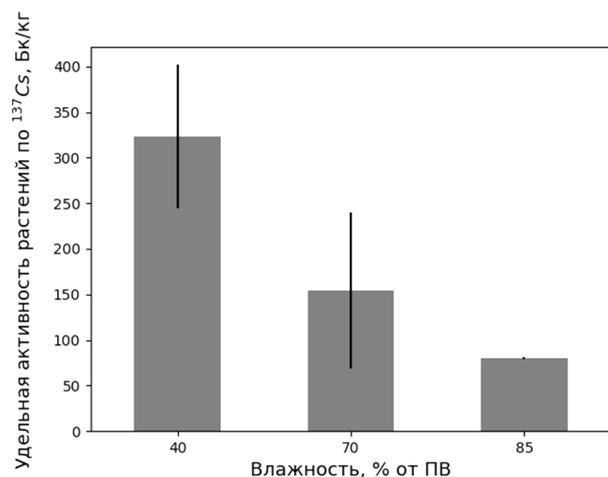


Рис. 2. Накопление ¹³⁷Cs в надземных органах яровой пшеницы при оптимальном уровне минерального питания

Fig. 2. Accumulation of ¹³⁷Cs in shoots of winter wheat depending on the water regime under the optimal nutrient supply

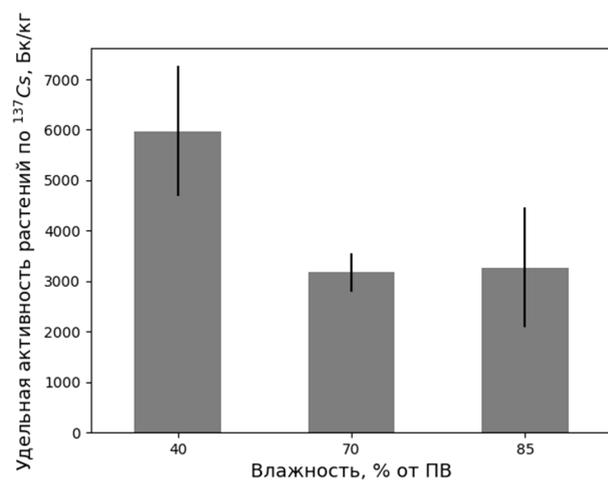


Рис. 3. Накопление ¹³⁷Cs в надземных органах яровой пшеницы на кислом субстрате с низким содержанием минеральных элементов питания

Fig. 3. Accumulation of ¹³⁷Cs in shoots of winter wheat depending on the water regime under the conditions of low pH and low content of nutrients in the substrate

при увлажнении 70 и 85 % от ПВ отсутствуют, в отличие от растений, находившихся в более благоприятных условиях минерального питания.

Зависимость коэффициентов накопления ¹³⁷Cs в побегах пшеницы от влажности субстрата сходна с таковой для удельной активности радионуклида (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Коэффициенты накопления ¹³⁷Cs в побегах яровой пшеницы на 41-е сутки вегетации на субстратах с разными уровнями минерального питания и влагообеспеченности
Table 3. Coefficients of ¹³⁷Cs accumulation in shoots of 41-diurnal winter wheat plants under the conditions of various nutrients and water content in the substrate

Влажность почвы, % от ПВ	Субстрат 1	Субстрат 2
40	0,033	0,785
70	0,015	0,421
85	0,008	0,428

Результаты эксперимента свидетельствуют, что при оптимальном уровне минерального питания содержание ¹³⁷Cs в надземных органах пшеницы в значительной степени зависит от уровня увлажнения почвенного субстрата (рис. 2). Так, при выращивании растений на субстрате 1 в варианте с содержанием воды 40 % от ПВ удельная активность надземной фитомассы составляет $323,3 \pm 78,4$ Бк/кг, что в 2 раза выше, чем у растений, выращенных при 70 %-ной влажности субстрата. Минимальная удельная активность наблюдалась в надземных органах пшеницы при содержании воды 85 % от ПВ – $80,7 \pm 3,5$ Бк/кг, что в 4 раза ниже, чем у растений, развивавшихся на субстрате с 40 %-ным содержанием влаги. Таким образом, на субстрате с высоким уровнем элементов минерального питания и близкой к нейтральной реакцией среды (pH_{KCl} 6,7) при всех вариантах увлажнения почвы прослеживается обратная зависимость между накоплением ¹³⁷Cs в надземных органах пшеницы и содержанием влаги в субстрате.

Удельная активность ¹³⁷Cs в надземных органах пшеницы яровой, выросшей на субстрате 2 с низким содержанием элементов питания и кислой реакцией среды, более чем на порядок выше, чем у растений, выросших в более благоприятных условиях, при сопоставимом содержании радиоизотопа в субстрате (рис. 3).

На низком агрофоне содержание ¹³⁷Cs в побегах яровой пшеницы при влажности субстрата 40 % от ПВ достигает $5977,3 \pm 1278,8$ Бк/кг. Это в 2 раза выше, чем у растений, развивавшихся на субстрате с влажностью 70 и 85 %, – $3181,5 \pm 381,4$ и $3272,8 \pm 1189,3$ Бк/кг соответственно. В условиях низкой pH и недостаточного содержания минеральных элементов питания в почве различия между вариантами

При оптимальном уровне минерального питания содержание радиоиотопа в растениях с увеличением влажности субстрата от 40 до 85 % последовательно снижается. На бедном субстрате с низким рН снижение коэффициентов накопления ^{137}Cs в растениях останавливается при уровне влажности до 70 % от ПВ. При идентичных режимах увлажнения почвы величины коэффициентов накопления у растений на субстратах с оптимальным (субстрат 1) и низким (субстрат 2) агрофоном различаются в 23–53 раза; максимальные различия отмечены при 85 %-ном содержании влаги в субстрате.

Проведенное после завершения эксперимента определение содержания радиоактивного изотопа цезия в почвенной среде в биологически доступных формах (растворенной и обменной) в зависимости от уровня влагообеспеченности субстрата не подтвердило предположение об увеличении доли биодоступных форм ^{137}Cs в почве при повышении ее влажности. Доля радиоиотопа в доступной для корневого поглощения форме при отсутствии достоверных различий между вариантами увлажнения в опыте не превышала 1 % от содержания радиоиотопа в субстрате (рис. 4).

Обсуждение. Механизм усвоения радиоиотопов щелочных и щелочноземельных металлов корнями растений во многом подобен усвоению калия и кальция соответственно. В почвенной среде основными лимитирующими факторами выступают ионно-обменные реакции и диффузия. Основное количество радиоиотопов извлекается корнями из почвенного раствора, а также из почвенно-поглощающего комплекса, с частицами которого тесно контактируют корневые волоски, или зона поглощения корня.

Результаты эксперимента свидетельствуют о повышении уровней накопления ^{137}Cs надземными органами пшеницы при недостаточном уровне влагообеспеченности. Данная закономерность с высокой степенью статистической значимости повторяется на почвенных субстратах с различным уровнем содержания минеральных элементов питания. Долговременное повышение влажности сверх оптимального уровня приводит к снижению содержания ^{137}Cs в надземных органах пшеницы при оптимальном и близком к нему уровнях минерального питания. На бедном агрофоне повышенная влажность почвы существенно не отражается на уровне накопления радиоиотопа. При этом режим увлажнения не оказывает существенного влияния на содержание ^{137}Cs в растворенной и обменной формах. По-видимому, закономерности, выявленные при выращивании растений в вегетационных сосудах, ограничивающих доступный объем для корневых систем, определяются в первую очередь физиологической реакцией растительного организма и прежде всего особенностями развития и метаболизма корневых систем. Активация или ингибирование системы поглощения ионов из внешней среды, их движения по симпласту и выброса в ксилему для дальнейшего транспорта в надземные органы тесно связаны с дыхательной активностью корней [11]. Известно, что энергетические затраты дыхания на поглощение ионов сравнительно невысоки по сравнению с затратами на рост и поддержание корней [12]. У злаковых растений, относительно устойчивых к понижению содержания влаги в субстрате, корневые системы, как первичные сенсоры водного стресса, реагируют на него усилением роста и активизацией дыхания [13], что в ограниченном объеме субстрата можно рассматривать как адаптивную реакцию, направленную на увеличение поглощения воды и катионов макро- и микроэлементов, чем в определенной степени можно объяснить разную форму связи между накоплением радиоиотопа побегами злаковых растений и водным режимом субстрата в условиях полевых опытов и вегетационного эксперимента.

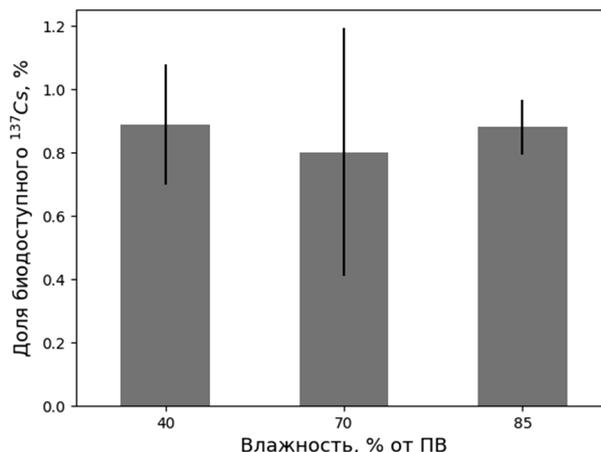


Рис. 4. Доля ^{137}Cs в растворенной и обменной формах при различных режимах увлажнения субстрата 1

Fig. 4. Percentage of ^{137}Cs in soluble and exchange forms in substrate 1 with different water regime

Основываясь на полученных результатах, предлагается рассмотреть механизм, объясняющий увеличение поступления ^{137}Cs в надземные органы пшеницы при недостаточной влагообеспеченности, с позиции мембранной биофизики. При уменьшении содержания воды в почве ниже физиологического оптимума резко усиливается работа систем активного транспорта катионов в корнях растений [14], что увеличивает содержание в них K^+ , Ca^{2+} и др. Показано, что адекватное снабжение растений K^+ важно для их адаптации к засухе [15]. Более того, на фоне недостаточного водоснабжения растения испытывают повышенную потребность в калии [16]. В то же время почвенная засуха сильно ослабляет способность растений к корневому поглощению данного элемента [17], что обусловлено как мобильностью K^+ в почве, так и снижением уровня транскрипции ионных переносчиков в корнях и нарушениями в их работе [18]. Основным механизмом корневого поглощения K^+ при его умеренном содержании в почвенном растворе являются калиевые каналы внутреннего выпрямления. Через них формируется однонаправленный поток калия за счет электрохимического градиента [19]. При развитии стресса у растений, в том числе вызываемого недостатком воды в почве, наблюдается деполяризация мембраны под действием абсцизовой кислоты [20]. При этом роль высокоафинных переносчиков калия возрастает.

В ряде работ показано, что засуха приводит к активации высокоафинных переносчиков K^+ на уровне транскрипции, что позволяет растениям в определенной степени адаптироваться к неблагоприятным условиям. Среди данных переносчиков – KUP6 , переносчик с высокой аффинностью к K^+ из семейства KUP/НАК/КТ [21]. Он экспрессируется в эпидермисе корня и, как предполагается, играет значительную роль в поглощении калия корневой системой в условиях его нехватки в почве. Активность данного переносчика повышается в ответ на стимуляцию абсцизовой кислотой. Переносчики K^+ KUP/НАК/КТ типа имеют высокую аффинность не только к K^+ , но и к ионам Cs^+ , в отличие от калиевых каналов внутреннего выпрямления [22, 23].

Следовательно, есть основание предположить, что увеличение активности высокоафинных переносчиков K^+ может являться одним из действенных факторов повышенного накопления ^{137}Cs растениями в условиях нехватки почвенной влаги.

Закключение. Установлена зависимость параметров накопления ^{137}Cs в надземных органах яровой пшеницы от режима увлажнения почвы начиная с ранних этапов развития растений. По результатам вегетационного эксперимента показано, что увеличение содержания воды в почве от 40 до 85 % от полной влагоемкости снижает содержание ^{137}Cs в растениях. Характер зависимости между влажностью почвы и накоплением ^{137}Cs надземными органами растений определяется агрохимическими особенностями почвы.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Природопользование и экология» на 2016–2020 гг.

Acknowledgements. The investigations were supported by State program of scientific research “Environmental management and ecology”, 2016–2020.

Список использованных источников

1. Логинов, В. Ф. Глобальные и региональные изменения климата: причины и следствия / В. Ф. Логинов. – Минск : ТетраСистемс, 2007. – 496 с.
2. Will global warming affect soil-to-plant transfer of radionuclides? / M. Dowdall [et al.] // J. Environmental Radioactivity. – 2008. – Vol. 99, N 11. – P. 1736–1745. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.06.012>
3. Михайловская, Л. Н. Влияние режима увлажнения на подвижность радионуклидов в почвах аварийной зоны Чернобыльской АЭС / Л. Н. Михайловская, Е. Н. Караваева, И. В. Молчанова // Экология. – 1992. – № 2. – С. 76–79.
4. Перельман, А. И. Геохимия ландшафта / А. И. Перельман. – М. : Географгиз, 1961. – 496 с.
5. Молчанова, И. В. Эколого-геохимические аспекты миграции радионуклидов в почвенно-растительном покрове / И. В. Молчанова, Е. Н. Караваева. – Екатеринбург : Рос. акад. наук. Урал. отд-ние, 2001. – 160 с.
6. Анненков, Б. Н. Основы сельскохозяйственной радиологии / Б. Н. Анненков, Е. В. Юдинцева. – М. : Агропромиздат, 1991. – 286 с.
7. Ehlken, S. Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: a review / S. Ehlken, G. Kirchner // J. Environmental Radioactivity. – 2002. – Vol. 58, N 2–3. – P. 97–112. [https://doi.org/10.1016/s0265-931x\(01\)00060-1](https://doi.org/10.1016/s0265-931x(01)00060-1)
8. Воздействие эпибрасинолида на накопление ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am чернобыльских эмиссий травостоем пойменного злакового луга при разных уровнях влажности и трофности почвы / Т. А. Будкевич [др.] // Ботаника (исследования): сб. науч. тр. / Ин-т эксперим. ботаники НАН Беларуси. – Минск : Право и экономика, 2009. – Вып. 37. – С. 341–356.

9. Куликов, Н. В. Влияние режима почвенного увлажнения на переход стронция-90, цезия-137 и церия-144 из почвы в раствор / Н. В. Куликов, И. В. Молчанова, Е. Н. Караваева // Экология. – 1973. – № 4. – С. 57–62.
10. Козлова, А. А. Учебная практика по физике почв : учеб.-метод. пособие. – Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2009. – 81 с.
11. Головкин, Т. К. Дыхание растений (физиологические аспекты) / Т. К. Головкин. – СПб. : Наука, 1999. – 204 с.
12. McCree, K. J. Whole-plant carbon balance during osmotic adjustment to drought and salinity stress / K. J. McCree // Austral. J. Plant. Physiol. – 1986. – Vol. 13, N 1. – P. 33–44. <https://www.publish.csiro.au/fp/PP9860033>
13. Veen, B. W. Relation between root respiration and root activity / B. W. Veen // Plant Soil. – 1981. – Vol 63, N 1. – P. 73–78. <https://www.publish.csiro.au/fp/PP9860033>
14. Кузнецов, В. В. Физиология растений / В. В. Кузнецов, Г. А. Дмитриева. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2006. – 742 с.
15. Cakmak, I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants / I. Cakmak // J. Plant Nutr. Soil Sci. – 2005. – Vol. 168, N 4. – P. 521–530. <https://doi.org/10.1002/jpln.200420485>
16. Cakmak, T. Role of mineral nutrients in photosynthesis and yield formation / T. Cakmak, C. Engels // Mineral nutrition of crops: mechanisms and implications / ed. Z. Rengel. – New York, 1999. – P. 141–168.
17. Hu, Y. Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants / Y. Hu, U. Schmidhalter // J. Plant Nutr. Soil Sci. – 2005. – Vol. 168, N 4. – P. 541–549. <https://doi.org/10.1002/jpln.200420516>
18. Hu, L. Effects of cytokinin and potassium on stomatal and photosynthetic recovery of kentucky bluegrass from drought stress / L. Hu, Z. Wang, B. Huang // Crop Sci. – 2013. – Vol. 53, N 1. – P. 221–231. <https://doi.org/10.2135/cropsci2012.05.0284>
19. Gierth, M. Potassium transporters in plants-involvement in K⁺ acquisition, redistribution and homeostasis / M. Gierth, P. Mäser // FEBS Letters. – 2007. – Vol. 581, N 12. – P. 2348–2356. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2007.03.035>
20. Molecular biology of K⁺ transport across the plant cell membrane: what do we learn from comparison between plant species? / A.-A. Véry [et al.] // J. Plant Physiol. – 2014. – Vol. 171, N 9. – P. 748–769. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.01.011>
21. Osmotic stress responses and plant growth controlled by potassium transporters in arabidopsis / Y. Osakabe [et al.] // Plant Cell. – 2013. – Vol. 25, N 2. – P. 609–624. <https://doi.org/10.1105/tpc.112.105700>
22. The high affinity K⁺ transporter AtHAK5 plays a physiological role in plant at very low K⁺ concentrations and provides a caesium uptake pathway in arabidopsis / Z. Qi [et al.] // J. Experim. Botany. – 2008. – Vol. 59, N 3. – P. 595–607. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm330>
23. Burger, A. Stable and radioactive cesium: A review about distribution in the environment, uptake and translocation in plants, plant reactions and plants' potential for bioremediation / A. Burger, I. Lichtscheidl // Sci. Total Envir. – 2018. – Vol. 618. – P. 1459–1485. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.298>

References

1. Loginov V. F. *Global and regional climate changes: cause and effect*. Minsk, TetraSistems Publ., 2007. 496 p. (in Russian).
2. Dowdall M., Standring W., Shaw G., Strand P. Will global warming affect soil-to-plant transfer of radionuclides? *Journal of Environmental Radioactivity*, 2008, vol. 99, no. 11, pp. 1736–1745. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.06.012>
3. Mikhailovskaya L. N., Karavaeva E. N., Molchanova I. V. Influence of water regime of soils in impact-zone of Chernobyl NPP. *Ekologiya = Ecology*, no. 2, pp. 76–79 (in Russian).
4. Perel'man A. I. *Landscapes geochemistry*. Moscow, Geografiz Publ., 1961. 496 p. (in Russian).
5. Molchanova I. V., Karavaeva E. N. *Ecological and geochemical sides of radionuclides migration in soil-plant cover*. Ekaterinburg, Russian Academy of Sciences, Ural Branch, 2001. 160 p. (in Russian).
6. Annenkov B. N., Yuditseva E. V. *Basics of agricultural radiology*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1991. 286 p. (in Russian).
7. Ehlken S., Kirchner G. Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: a review. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2002, vol. 58, no. 2–3, pp. 97–112. [https://doi.org/10.1016/s0265-931x\(01\)00060-1](https://doi.org/10.1016/s0265-931x(01)00060-1)
8. Budkevich T. A., Zabolotnyi A. I., Kas'yanchik S. A., Kudryashov V. P. The effect of epibrassinolide to the biological mobility of ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am under different soil moisture and trofic levels on the cereal water meadow. *Botanika (issledovaniya): sbornik nauchnykh trudov* [Botany (research): collection of scientific papers], 2009, vol. 37, pp. 341–356 (in Russian).
9. Kulikov N. V., Molchanova I. V., Karaeva E. N. Influence of soil water regime on the transfer of strontium-90, cesium-137 and cerium-144 from soil into solution. *Ekologiya = Ecology*, 1973, no. 4, pp. 57–62 (in Russian).
10. Kozlova A. A. *Study practice on soil physics*. Irkutsk, Irkutsk State University, 2001. 81 p. (in Russian).
11. Golovko T. K. *Respiration of plants. Physiological aspects*. Sankt-Peterburg, Nauka Publ., 1999. 204 p. (in Russian).
12. McCree K. J. Whole-plant carbon balance during osmotic adjustment to drought and salinity stress. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1986, vol. 13, no. 1, pp. 33–44. <https://www.publish.csiro.au/fp/PP9860033>
13. Veen B. W. Relation between root respiration and root activity. *Plant and Soil*, 1981, vol. 63, no. 1, pp. 73–78. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-8314-4_53
14. Kuznetsov V. V., Dmitrieva G. A. *Plants physiology*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2006. 742 p. (in Russian).

15. Cakmak I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, vol. 68, no. 4, pp. 521–530. <https://doi.org/10.1002/jpln.200420485>
16. Cakmak T., Engels C. Role of mineral nutrients in photosynthesis and yield formation. *Mineral nutrition of crops: mechanisms and implications*. New York, 1999, pp. 141–168.
17. Hu Y., Schmidhalter U. Drought and salinity: a comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, vol. 168, no. 4, pp. 541–549. <https://doi.org/10.1002/jpln.200420516>
18. Hu L., Wang Z., Huang B. Effects of cytokinin and potassium on stomatal and photosynthetic recovery of kentucky bluegrass from drought stress. *Crop Science*, 2013, vol. 53, no. 1, pp. 221–231. <https://doi.org/10.2135/cropsci2012.05.0284>
19. Gierth M., Mäser P. Potassium transporters in plants-involvement in K⁺ acquisition, redistribution and homeostasis. *FEBS Letters*, 2007, vol. 581, no. 12, pp. 2348–2356. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2007.03.035>
20. Véry A. A., Nieves-Cordones M., Daly M., Khan I., Fizames C., Sentenac H. Molecular biology of K⁺ transport across the plant cell membrane: What do we learn from comparison between plant species? *Journal of Plant Physiology*, 2014, vol. 171, no. 9, pp. 748–769. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.01.011>
21. Osakabe Y., Arinaga N., Umezawa T., Katsura S., Nagamachi K., Tanaka H. [et al.]. Osmotic stress responses and plant growth controlled by potassium transporters in arabidopsis. *Plant Cell*, 2013, vol. 25, no. 2, pp. 609–624. <https://doi.org/10.1105/tpc.112.105700>
22. Qi Z., Hampton C. R., Shin R., Barkla B. J., White P. J., Schachtman D. P. The high affinity K⁺ transporter AtHAK5 plays a physiological role in planta at very low K⁺ concentrations and provides a caesium uptake pathway in arabidopsis. *Journal of Experimental Botany*, 2008, vol. 59, no. 3, pp. 595–607. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm330>
23. Burger A., Lichtscheidl I. Stable and radioactive cesium: A review about distribution in the environment, uptake and translocation in plants, plant reactions and plants' potential for bioremediation. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 618, pp. 1459–1485. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.298>

Информация об авторах

Никитин Александр Николаевич – канд. с.-х. наук, заведующий лабораторией. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: nikitinale@gmail.com

Шуранкова Ольга Александровна – науч. сотрудник. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: shurankova@list.ru

Чешик Игорь Анатольевич – канд. мед. наук, доцент, директор. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: igor.cheshik@gmail.com

Леферд Галина Аркадьевна – науч. сотрудник. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: leferd@mail.ru

Мищенко Егор Викторович – мл. науч. сотрудник. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: 60ssr@mail.ru

Жуковская Евгения Викторовна – мл. науч. сотрудник. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: evgenia@yandex.by

Сухарева Диана Витальевна – науч. сотрудник. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: dianasuhareva@yandex.ru

Information about the authors

Aleksander N. Nikitin – Ph. D. (Agric.), Head of the Laboratory. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: nikitinale@gmail.com

Olga A. Shurankova – Researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: shurankova@list.ru

Ihar A. Cheshyk – Ph. D. (Med.), Assistant Professor, Director. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: igor.cheshik@gmail.com

Halina A. Leferd – Researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: leferd@mail.ru

Yahor V. Mishchanka – Junior researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: 60ssr@mail.ru

Evgenia V. Zhukovskaya – Junior researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: evgenia@yandex.by

Diana V. Suhareva – Researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: dianasuhareva@yandex.ru