

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-3-26-30>
УДК 631.438:546.36:564.42:581.5:539.16 (574.41)

НАКОПЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ CS-137 И SR-90 РАСТЕНИЯМИ НА УЧАСТКЕ РАДИОАКТИВНЫХ ВЫПАДЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Н.В. Ларионова, П.Е. Кривицкий, А.В. Топорова, Е.Н. Поливкина, А.О. Айдарханов

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

E-mail для контактов: laronova@nnc.kz

В статье представлены данные по содержанию и оценке параметров накопления искусственных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr степным разнотравьем на участке радиоактивных выпадений от взрыва в скважине 101 на бывшей испытательной площадке «Сары-Узень» Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Определено, что удельная активность ^{137}Cs в почвенно-растительном покрове исследуемой территории достигает 2700 Бк/кг, ^{90}Sr – до 3370 Бк/кг. Диапазоны значений Кн ^{137}Cs (0,0030–0,021) и ^{90}Sr (0,064–0,36) составляют по одному порядку. Наибольшим накоплением в растениях характеризуется ^{90}Sr , максимальные значения Кн которого отмечаются в зоне навала воронки от взрыва. Зависимостей изменения Кн с расстоянием от эпицентра ни для одного из радионуклидов не установлено. При этом все значения Кн на порядок выше полученных ранее Кн для эпицентров наземных ядерных испытаний и на порядок ниже, чем значения Кн этих радионуклидов, полученных в целом для пастбищ по данным МАГАТЭ.

Ключевые слова: искусственные радионуклиды, цезий (^{137}Cs), стронций (^{90}Sr), растения, коэффициент накопления (Кн).

ВВЕДЕНИЕ

Исследование закономерностей поступления радиоактивных веществ в растения является одной из основных задач в области радиоэкологии [1–5] и представляет значительный интерес в общей проблеме охраны окружающей среды. Широкое развитие исследования, посвященные изучению накопления радионуклидов растениями, получили с началом использования ядерной энергии, когда на разных этапах ядерно-топливного цикла, как вследствие нормальной, так и нештатной работы атомно-энергетических объектов (радиационных аварий и инцидентов) в окружающую среду стали поступать ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^3H , изотопы Рн и др.

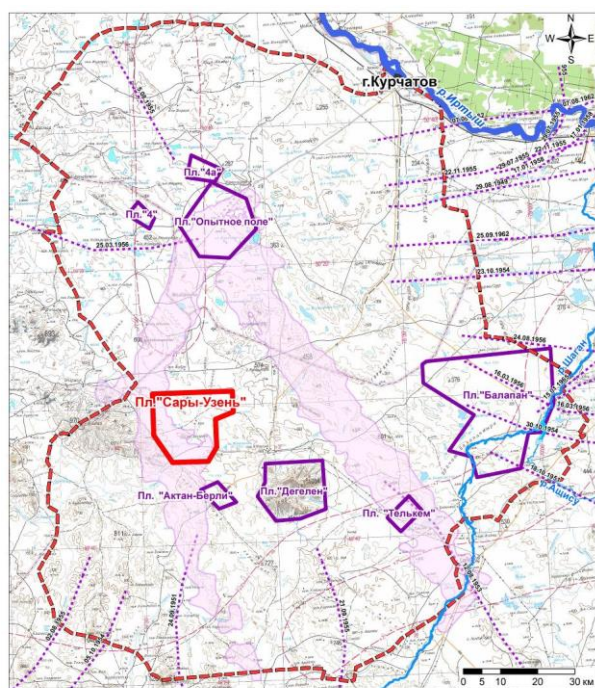
Существенный вклад в радиоактивное загрязнение природных экосистем внесли продукты глобальных выпадений, связанные с многолетними испытаниями ядерного оружия в середине прошлого века. Около 70% всех ядерных испытаний бывшего СССР проводилось на территории Казахстана, при этом большая часть из них на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП) [6].

С момента закрытия СИП получен большой объем информации относительно текущей радиационной обстановки на его территории, в том числе целостная картина параметров накопления искусственных радионуклидов из почвы растениями для территорий с различным характером радиоактивного загрязнения [7]. Однако, несмотря на многочисленность проведенных исследований, до настоящего времени существуют участки, представляющие научный интерес с точки зрения вариаций в накоплении радионуклидов растениями в силу особенностей радиоактивного загрязнения. Безусловно, к таким территориям относятся зоны проведения ядерных испытаний, одной из которых зон является бывшая испытательная площадка

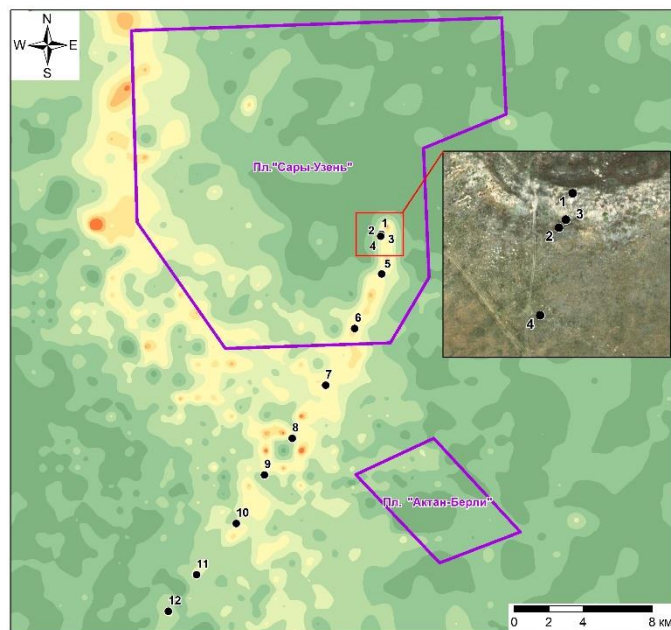
«Сары-Узень» – одна из 4-х наиболее крупных площадок, на которой в период с 1965 по 1980 гг. в основном проводились подземные ядерные испытания в вертикальных скважинах (рисунок 1, а).

Известно, что радиоактивное загрязнение площадки «Сары-Узень» обусловлено 2 типами: загрязнение, образовавшееся за счет переноса и выпадения радионуклидов вследствие проведения эксперимента на площадке «Опытное поле» 24.09.1951 года, и загрязнение от экспериментов на самой площадке. В первом случае радиоактивное загрязнение представляет собой след выпадений, протянувшийся от северо-западной части площадки до самого юга, во втором – выпадение радиоизотопов вследствие проведения подземных ядерных испытаний с радиоактивным выбросом на территории самой площадки [8].

Объектом исследования в настоящей работе стала территория радиоактивного загрязнения, образовавшегося в результате испытания, проведенного в боевой скважине 101 на площадке «Сары-Узень». Подземный ядерный взрыв был произведен на глубине 225 м 18.12.1966 года мощностью менее 150 кт. В результате взрыва произошел прорыв в атмосферу через толщу и купол раздробленной породы радиоактивных газов и аэрозолей. Основная доля радиоактивных продуктов выпала в районе образовавшейся воронки (диаметром около 400 м и глубиной 20 м) и на ближнем «следе» протяженностью несколько десятков километров [6]. Целью данного исследования стало изучение особенностей накопления искусственных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr из почвы в растениях на участке радиоактивных выпадений от взрыва в скважине 101, включая участок пересечения со «следом» от взрыва 1951 года на площадке «Опытное поле» (рисунок 1, а, б).



а)



б)

Рисунок 1. Расположение площадки «Сары-Узень» на территории СИП (а); расположение точек отбора (б)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовательские площадки (точки отбора проб) заложены в границах «следа» от взрыва в скважине 101 (рисунок 1, б). Участки для проведения исследований выбраны на основании данных о площадном распределении ^{137}Cs и результатов измерений радиационных параметров (плотности потока β -частиц и мощности эквивалентной дозы (МЭД)) во время проведения экспедиционных работ. На каждой площадке произведен отбор смешанной пробы почвы (методом «конверта» на глубину 5 см) и надземной части растений (площадь отбора $\sim 1\text{--}2\text{ м}^2$). Проба растений также представляла собой смешанный образец степного разнотравья с приблизительно одинаковым доминированием ковыля (*Stipa capillata*, *S. sareptana*, *S. lessingiana*), типчака (*Festuca valesiaca*) и полыни (*Artemisia gracileccens*, *A. frigida*).

Подготовка проб и анализ по измерению удельной активности радионуклидов в пробах почвы и растений проводили в соответствии со стандартизованными методическими указаниями [9, 10] на поверженном оборудовании. Определение удельной активности радионуклидов ^{137}Cs проводили на гамма-спектрометре Canberra GX-2020, ^{90}Sr – радиохимическим выделением с последующим измерением на бета-спектрометре TRI-CARB 2900 TR. Концентрацию радионуклидов в растениях определяли в золе, с последующим пересчетом на сухое вещество. Предел обнаружения по ^{137}Cs составлял 1 Бк/кг (для проб рас-

тений) и 4 Бк/кг (для проб почвы), ^{90}Sr – 1 Бк/кг и 5 Бк/кг, соответственно. Погрешность измерений для ^{137}Cs не превышала 10–20%, ^{90}Sr – 15–25%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные значения удельной активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в пробах почв и растений представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения удельной активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в пробах почв и растений

№ точки	Удельная активность радионуклидов, Бк/кг			
	^{137}Cs		^{90}Sr	
	растение	почва	растение	почва
1	28±6	2700±500	390±60	3370±30
2	15±3	2200±400	750±110	2090±20
3	29±6	2200±400	190±30	2460±30
4	8,1±1,6	2500±500	300±45	2560±30
5	3,1±0,6	400±80	36±5	510±80
6	1,1±0,2	370±70	53±8	310±50
7	2,9±0,6	140±30	21±3	150±20
8	1,8±0,4	150±30	12±2	140±20
9	2,3±0,5	260±50	19±3	220±30
10	0,5±0,1	110±20	4,6±0,7	72±10
11	<0,4	175±35	12±2	116±20
12	1±0,2	80±16	8,6±1,3	75±10

На основании полученных данных установлено, что исследуемая территория относительно в равной степени загрязнена обоими радионуклидами, содер-

жание которых в почвенно-растительном покрове по ^{137}Cs достигает 2700 Бк/кг, по ^{90}Sr – до 3370 Бк/кг.

Для оценки параметров накопления радионуклидов в растениях из почвы рассчитаны Кн (отношение удельной активности в растениях к удельной активности в почве), которые представлены в виде диаграмм (рисунок 2).

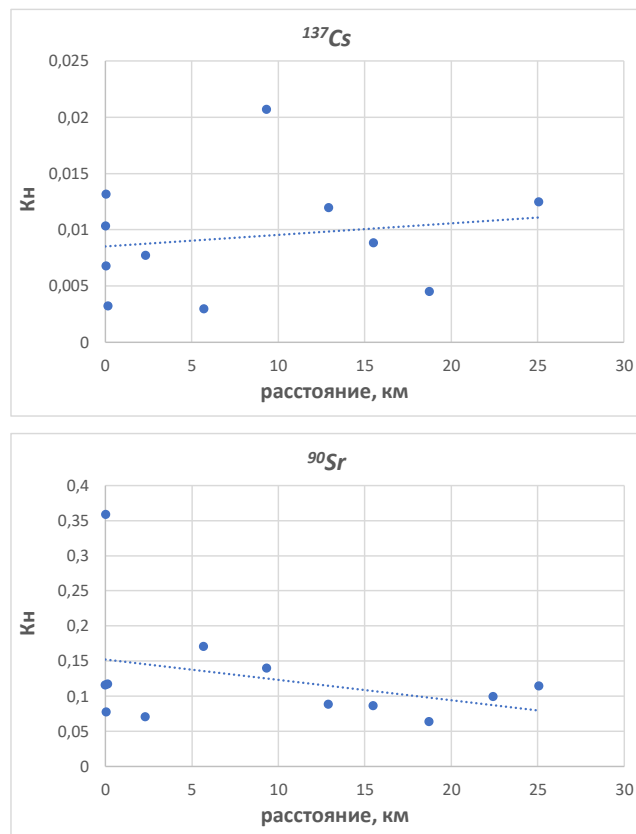


Рисунок 2. Распределение Кн ^{137}Cs и ^{90}Sr по «следу» радиоактивных выпадений от испытания в скважине 101

На основании проведенных расчетов установлено, что диапазоны значений Кн ^{137}Cs (0,0030–0,021) и ^{90}Sr (0,064–0,36) составляют по одному порядку. Наименьшим накоплением в растениях характеризуется ^{137}Cs , более высоким – ^{90}Sr . Максимальные значения Кн ^{90}Sr отмечаются в зоне навала воронки от взрыва. Однако, зависимостей изменения Кн с расстоянием от эпицентра ни для одного из радионуклидов не установлено. В данном случае, отсутствие закономерностей распределения значений Кн радионуклидов может быть связано с наличием дополнительного загрязнения исследуемой территории радиоактивными осадками от взрыва 1951 г. (изолиния 0,25 Ки/км² для ^{137}Cs показана на карте (рисунок 1, а)).

Для общей оценки полученных значений Кн ^{137}Cs и ^{90}Sr в таблице 2 приведены Кн для пастбищных растений по обобщенным данным МАГАТЭ [11], а также Кн, полученные ранее для других участков СИП [7, 12], характеризующихся аналогичными почвенно-

климатическими условиями и типом радиоактивного загрязнения:

- участки проведения экскавационных взрывов на площадке «Телькем»;
- эпицентры наземных испытаний на «Опытном поле»;
- «следы» радиоактивных выпадений (ближних на «Опытном поле» и дальнего от взрыва 1953 года);
- условно «фоновые» участки СИП.

Таблица 2. Среднегеометрические значения Кн ^{137}Cs и ^{90}Sr на исследованных территориях СИП [7, 12] и международные обобщенные данные МАГАТЭ [11]

Исследуемые территории	Средние значения Кн радионуклидов (в скобках – число случаев)	
	^{137}Cs	^{90}Sr
исследуемая территория (скважина 101)	0,010 (11)	0,11 (12)
исследованные ранее территории СИП [7, 10]		
территория площадки «Телькем»	0,026 (63)	0,096 (50)
эпицентры наземных испытаний	0,0028 (72)	0,023 (67)
«следы» радиоактивных выпадений	0,020 (30)	0,026 (24)
условно «фоновые» территории	0,030 (40)	0,25 (18)
данные МАГАТЭ [11]		
пастбища	0,4 (124)	1,2 (58)

Исходя из данных, полученных ранее на территории СИП, средние значения Кн ^{137}Cs и ^{90}Sr , установленные для исследуемого района скважины 101, значительно (в среднем на порядок) выше значений, определенных ранее для эпицентров наземных ядерных испытаний на «Опытном поле». При этом данные значения близки к таковым для условно «фоновых» территорий СИП и для участков проведения экскавационных взрывов на площадке «Телькем», а Кн ^{137}Cs также – для «следов» радиоактивных выпадений.

В случае сравнительного анализа с данными МАГАТЭ, Кн ^{137}Cs и ^{90}Sr , полученные для исследуемой территории, на порядок ниже, чем значения Кн этих радионуклидов, полученных в целом для пастбищ [11]. Установленные различия, прежде всего, могут быть связаны с особенностями радиоактивного загрязнения районов проведения ядерных испытаний, в большинстве случаев характеризующихся содержанием радионуклидов в почвах в сравнительно менее доступном состоянии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования определено, что удельная активность ^{137}Cs в почвенно-растительном покрове на участке радиоактивных выпадений от взрыва в скважине 101 на бывшей испытательной площадке «Сары-Узень» достигает 2700 Бк/кг, ^{90}Sr – до 3370 Бк/кг. Диапазоны значений Кн ^{137}Cs (0,0030–0,021) и ^{90}Sr (0,064–0,36) составляют по одному порядку. Наименьшим накоплением в рас-

тениях характеризуется ^{137}Cs , более высоким – ^{90}Sr . Максимальные значения Кн ^{90}Sr отмечаются в зоне навала воронки от взрыва, однако, зависимостей изменения Кн с расстоянием от эпицентра ни для одного из радионуклидов не установлено. При этом все значения Кн на порядок выше полученных ранее Кн для эпицентров наземных ядерных испытаний и на порядок ниже, чем значения Кн этих радионуклидов, полученных в целом для пастбищ по данным МАГАТЭ, при этом наиболее близки к значениям для условно «фоновых» территорий СИП и для участков проведения экскавационных взрывов на площадке «Телькем».

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках научного гранта AP08856481 «Оценка радиационного состояния растительного покрова с точки зрения его сельскохозяйственного назначения».

ЛИТЕРАТУРА

- Вернадский, В. И. Избранные сочинения: в 5 т. / отв. ред. акад. А. П. Виноградов; Акад. наук СССР. – Москва: Изд-во АН СССР, 1960. – Т. 5.: Биосфера I-II: Статьи по биогеохимии; Почвы; Газы; Метеориты и космическая пыль. – 1960. – 422 с.
- Тимофеев-Ресовский, Н. В. Избранные труды / Н. В. Тимофеев-Ресовский; под ред. О. Г. Газенко и В. И. Иванова. – М.: Медицина, 1996. – 480 с. – ISBN 5-225-00773-2.
- Алексахин, Р. М. Сельскохозяйственная радиоэкология: В кн. Агроэкология. – М.: Колос, 2000. – С. 300–322.
- Санжарова, Н.И. Пересмотр параметров миграции радионуклидов в агроэкосистемах / Н. И. Санжарова, С. В. Фесенко, А. О. Шубина // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2009. – № 3. – С. 268–276.
- Natalia Semioshkina, Gabriele Margarete Voigt Soil - Plant transfer of radionuclides in arid environments // Journal of Environmental Radioactivity. – 2021. – Vol. 237, 106692.
- Ядерные испытания СССР. Семипалатинский полигон: обеспечение общей и радиационной безопасности ядерных испытаний / Кол. авторов под рук. В. А. Логачева. – М.: 2-я тип. ФУ «Медбиоэкстрем» при Минздраве России, 1997. – 347 с. – ISBN 5-88918-008-8.
- Larionova, N.V. Transfer of radionuclides to plants of natural ecosystems at the Semipalatinsk Test Site / N. V. Larionova, S. N. Lukashenko, A. M. Kabdyrakova [at al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2018. – № 186. – P. 163–170.
- Krivitskiy, P.Ye. Characterization of area radioactive contamination of near-surface soil at the Sary-Uzen site in the Semipalatinsk test site / P. Ye. Krivitskiy, N. V. Larionova, Yu. V. Baklanova, A. O. Aidarkhanov, S. N. Lukashenko // Journal of Environmental Radioactivity. – 2022. – № 249 – 106893.
- Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре: МИ 2143-91: МИ 5.06.001.98 РК. – Алматы, 1998. – 18 с.
- Методика определения содержания искусственных радионуклидов плутония-(239+240), стронция-90 в объектах окружающей среды (почвах, грунтах, донных отложениях и растениях). – Алматы, 2010. – 25 с.
- Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments: IAEA TECDOC-1616/ IAEA. – Vienna, 2009. – 163 p. – ISBN 978-92-0-104509-6.
- Larionova, N.V. Transfer parameters of radionuclides from soil to plants at the area of craters produced by underground nuclear explosions at the Semipalatinsk test site areas / Larionova, N.V., S.N. Lukashenko, O.N. Lyakhova [at al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2021. – No. 237. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106684>

REFERENCES

- Vernadsky, V. I. Selected works: in 5 vol. / ed-in-chief, academician. A. P. Vinogradov; USSR Academy of Sciences. – Moscow: Publishing House of AS USSR, 1960. – Vol. 5: Biosphere I-II: Biogeochemistry articles; Sols; Gases; Meteorites and cosmic dust. – 1960. – 422 p.
- Timofeev-Resovsky, N. V. Selecta / N. V. Timofeev-Resovsky; edited by O. G. Gazenko and V. I. Ivanov. – Moscow: Medicine, 1996. – 480 p. – ISBN 5-225-00773-2.
- Aleksakhin, R. M. Agricultural radioecology: In the book on Agroecology. – Moscow: Kolos, 2000. – P. 300–322.
- Sanzharova, N.I. Revision of parameters of radionuclide migration in agroecosystems / N. I. Sanzharova, S. V. Fesenko, A. O. Shubin // Radiation biology. Radioecology. – 2009. – No. 3. – P. 268–276.
- Natalia Semioshkina, Gabriele Margarete Voigt Soil - Plant transfer of radionuclides in arid environments // Journal of Environmental Radioactivity. – 2021. – Vol. 237, 106692.
- Nuclear tests of the USSR. The Semipalatinsk Test Site: general and radiation safety assurance during nuclear tests / contributed authors supervised by V. A. Logachev. – Moscow: 2nd printing house FA “Medbioekstrem” under the Russia Ministry of Healthcare, 1997. – 347 p. – ISBN 5-88918-008-8.
- Larionova, N.V. Transfer of radionuclides to plants of natural ecosystems at the Semipalatinsk Test Site / N. V. Larionova, S. N. Lukashenko, A. M. Kabdyrakova [at al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2018. – No. 186. – P. 163–170.
- Krivitskiy, P.Ye. Characterization of area radioactive contamination of near-surface soil at the Sary-Uzen site in the Semipalatinsk test site / P. Ye. Krivitskiy, N. V. Larionova, Yu. V. Baklanova, A. O. Aidarkhanov, S. N. Lukashenko // Journal of Environmental Radioactivity. – 2022. – No. 249 – 106893.
- Activities of radionuclides in bulk samples. Measurement procedure with a gamma spectrometer: MP 2143-91: MP 5.06.001.98 RK. – Almaty, 1998. – 18 p.
- Determination procedure of the content of artificial radionuclides plutonium-(239+240), strontium-90 in environmental compartments (soils, bottom sediments and plants). – Almaty, 2010. – 25 p.
- Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments: IAEA TECDOC-1616/ IAEA. – Vienna, 2009. – 163 p. – ISBN 978-92-0-104509-6.

12. Larionova, N.V. Transfer parameters of radionuclides from soil to plants at the area of craters produced by underground nuclear explosions at the Semipalatinsk test site areas / Larionova, N.V., S.N. Lukashenko, O.N.

Lyakhova [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2021. – No. 237. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106684>

СЕМЕЙ СЫНАҚ ПОЛИГОНЫ АУМАҒЫНДАҒЫ РАДИОАКТИВТІ ТҮСУЛЕР УЧАСКЕСІНДЕ ӨСІМДІКТЕРДЕ CS-137 ЖӘНЕ SR-90 РАДИОНУКЛИДТЕРІНІҢ ЖИНАҚТАЛУ

Н.В. Ларионова, П.Е. Кривицкий, А.В. Топорова, Е.Н. Поливкина, А.О. Айдарханов

ҚР ҰҰО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатова, Қазақстан

Мақалада Семей сынақ полигонының (ССП) бұрынғы «Сары-Өзен» сынақ алаңындағы №101 ұңғымасындағы жарылыстан радиоактивті түсу учаскесіндегі дала шөптерімен ^{137}Cs және ^{90}Sr жасанды радионуклидтердің жинақталу параметрлерінің құрамы және бағалауы бойынша деректер ұсынылған. Зерттелетін аумақтың топырақ-өсімдік жамылғысындағы ^{137}Cs меншіктік белсенділігі 2700 Бк/кг-ға, ^{90}Sr – 3370 Бк/кг-ға дейін жететіні анықталды, ^{137}Cs (0,0030-0,021) және ^{90}Sr (0,064-0,36) Жк мәндерінің диапазоны бір рет бойынша құрайды. Өсімдіктердегі ең үлкен жинақталу ^{90}Sr -мен сипатталады, оның максималды мәні жарылыс қазаншұңқырының үйіндісі аймағында белгіленеді. Эпицентрден арақашықтықтағы Жк өзгерісінде радионуклидтердің ешбіріне деген тәуелділігі анықталған жоқ. Бұл ретте Жк-ның барлық мәндері жер бетіндегі ядролық сынақтардың эпицентрлері үшін бұрын алынған Жк-дан біршама жоғары және АТЭХАГ деректері бойынша жайылымдар үшін тұтастай алынған осы радионуклидтердің Жк-нің мәндерінен біршама төмен.

Түйін сөздер: жасанды радионуклидтер, цезий (^{137}Cs), стронций (^{90}Sr), өсімдіктер, жинақтау коэффициенті (Жк).

ACCUMULATION OF CS-137 AND SR-90 BY PLANTS IN THE FALLOUT AREA AT THE SEMIPALATINSK TEST SITE

N.V. Larionova, P.Ye. Krivitskiy, A.V. Toporova, Ye.N. Polivkina, A.O. Aidarkhanov

Branch “Institute of Radiation Safety and Ecology” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The article presents data on the content and assessment of parameters of artificial ^{137}Cs and ^{90}Sr accumulation by steppe motley grasses in the fallout area in borehole 101 of the former ‘Sary-Uzen’ testing site of the Semipalatinsk Test Site (STS). ^{137}Cs activity concentration in land cover of the study area was found to reach 2,700 Bq/kg, ^{90}Sr – up to 3,370 Bq/kg. The ranges of Tf values for ^{137}Cs (0.0030-0.021) and ^{90}Sr (0.064-0.36) are one order of magnitude each. ^{90}Sr is most accumulated in plants. Its Tf maxima are noted in the dump zone of the explosion crater. No Tf variation dependences on the distance from ground zero were found for either radionuclide. At the same time, Tf values are one order of magnitude higher than the ones previously obtained for ground zeros of aboveground nuclear tests and one order of magnitude lower than Tf values for these radionuclides obtained as a whole for pastures as reported by IAEA.

Keywords: artificial radionuclides, cesium (^{137}Cs), strontium (^{90}Sr), plants, transfer factor (Tf).