

РАДИОБИОГЕОХИМИЯ

УДК 574: 577.39

Е.Н. Караваева, Л.Н. Михайловская, И.В. Молчанова, В.Н. Позолотина
Институт экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург,
Россия, e-mail: molchanova_i_v@mail.ru

НАКОПЛЕНИЕ ^{90}Sr И ^{137}Cs РАСТЕНИЯМИ ИЗ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ ЯДЕРНО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Биомасса наземной растительности доминирует в большинстве природных ландшафтов; она активно участвует в процессах биологического круговорота макро и микроэлементов в том числе техногенных радионуклидов. В настоящее время накоплен обширный материал, оценивающий особенности поглощения радионуклидов различными группами наземных растений. Убедительно показано, что аккумуляция их в фитомассе зависит от химических свойств излучателей, агрохимических характеристик почвы, биологических особенностей отдельных видов и условий их произрастания. Специфическая комбинация факторов формируется в каждом из районов действующих предприятий атомно-энергетического комплекса. Особый интерес представляет Уральский регион, в котором имеются территории, испытывающие пресс радиоактивного загрязнения, сформировавшегося в результате радиационных аварий и штатной эксплуатации ядерных предприятий.

Цель настоящей работы – изучение особенностей накопления ^{90}Sr и ^{137}Cs травянистыми растениями из почв, загрязненных в результате эксплуатации предприятий атомно-энергетического комплекса в штатном режиме и при аварийных ситуациях.

Материал и методика

В работе обобщены данные, полученные в период 2000-2009 гг. в результате радиоэкологического обследования зон воздействия производственного объединения (ПО) «Маяк» (Челябинская обл.) и Белоярской атомной электростанции (БАЭС) им. И.В. Курчатова (Свердловская обл.). Исследования на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС), сформировавшегося вследствие аварии 1957 г. на

ПО «Маяк», были сосредоточены на его центральной оси. Обследованная территория в градиенте загрязнения была условно разделена на две зоны: импактную, охватывающую головную часть следа протяженностью 30 км и буферную – от 30 до 100 км. В пойме р. Течи, загрязненной нерегламентированными сбросами ПО «Маяк» в 1949-1951 гг., исследования проводили на участках, удаленных на 80 - 240 км от истока реки.

Белоярская АЭС расположена на Среднем Урале в 60 км от г. Екатеринбурга. В ходе штатной эксплуатации БАЭС длительное время сбрасывала слаборадиоактивные дебалансные воды в открытую природную экосистему - Ольховское болото площадью 0.3 км², расположенное в 5-ти км к юго - востоку от станции. В результате в настоящее время запас радионуклидов (преимущественно ^{137}Cs) в донных отложениях болота составляет 3.7×10^{12} Бк. Объектом исследования являлась береговая зона Ольховского болота.

Почвенные пробы во всех случаях отбирали с учетом площади из полнопрофильных разрезов (в 3-5 повторностях) до глубины 30 - 40 см. В непосредственной близости от почвенных разрезов срезали наземную массу разнотравья или отдельных доминирующих видов растений (в 2-3 повторностях). Пробы почв и растений высушивали до воздушно-сухого состояния. Почву растирали и просеивали через сито с диаметром ячеек 1 мм, а растения озоляли при температуре 450-500⁰С.

Содержание ^{137}Cs в отобранных образцах определяли на многоканальном гамма-анализаторе с германиевым полупроводниковым детектором, с пределом обнаружения 0.1 Бк. Статистическая ошибка измерений – не более 15%. Содержание ^{90}Sr определяли радиохимическим методом по ^{90}Y . Для радиометрии препаратов использовали установку УФМ-2000 (предел обнаружения 0.2 Бк).

Аккумулирующую способность растений оценивали величиной коэффициента перехода (КП), которую рассчитывали как отношение удельной активности радионуклида в надземной массе растений (Бк/кг сух. массы) к плотности загрязнения опробованного слоя почвы, кБк/м². В условиях широкого диапазона плотности загрязнения территории этот показатель является наиболее информативным

(Корнеев, Сироткин, 1986; Щеглов, 2000).

Результаты и обсуждение

На первых этапах исследований, абстрагируясь от комплекса перечисленных выше факторов, влияющих на поступление радионуклидов в растения, оценили зависимость между удельной активностью в них ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs и плотностью загрязнения почв (рис. 1).

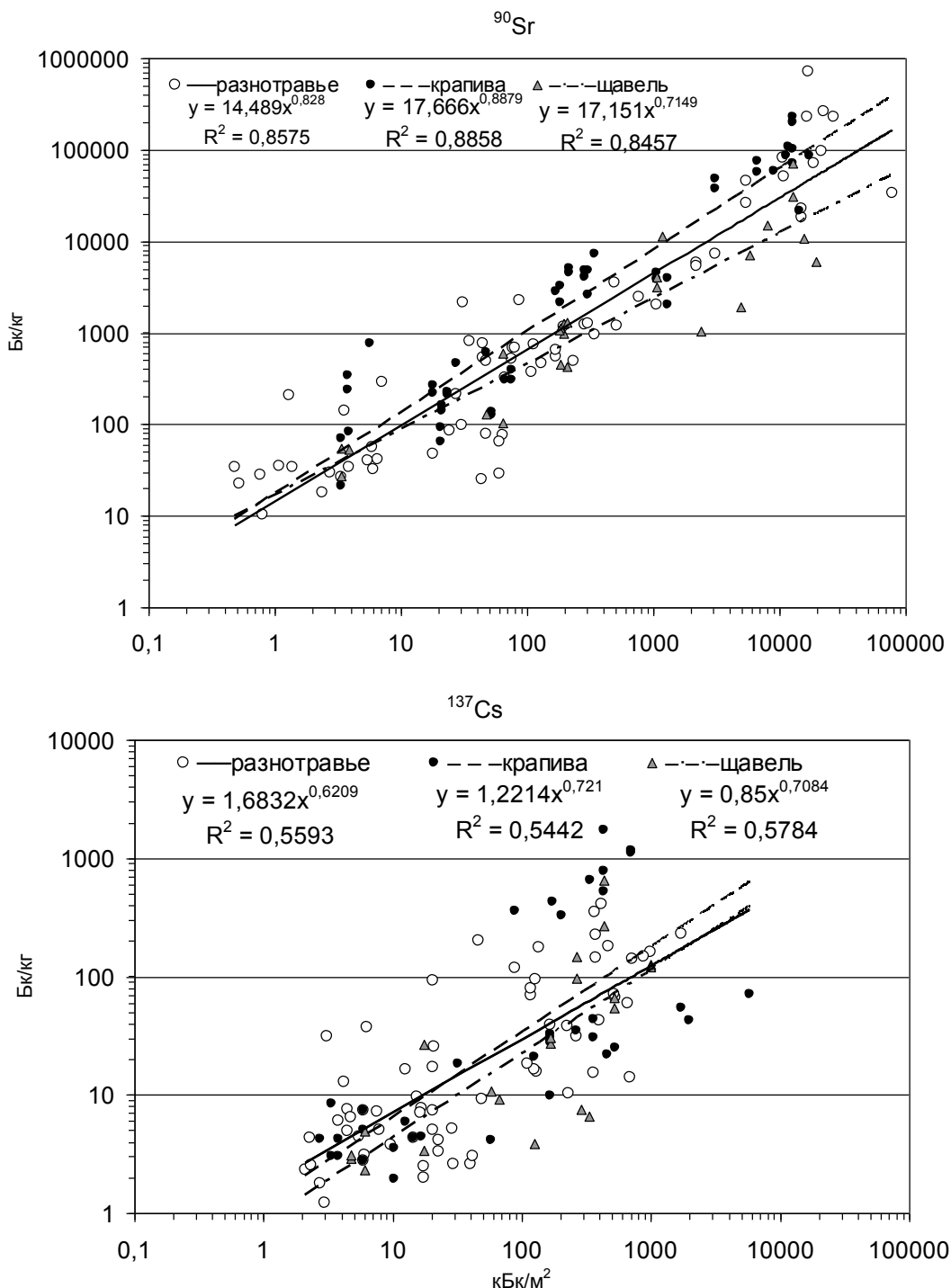


Рис.1. Удельная активность радионуклидов в надземной массе растений в зависимости от плотности загрязнения почв.

Видно, что изменение содержания радионуклидов в разнотравье с высокой степенью достоверности описывается степенной функцией. Поскольку в составе разнотравья нивелируется видовая специфичность травянистых растений, аналогичным образом были проанализированы данные и для некоторых доминирующих их представителей. Оказалось, что накопительная способность отдельных видов растений и разнотравья в широком диапазоне загрязнений выражается степенной функцией вида $y = ax^b$. Следовательно, разнотравье, представленное широким набором видов, аппроксимирует их видовые накопительные особенности.

В изученном градиенте плотностей загрязнения почв накопительную способность растений оценили величинами коэффициента перехода ($m^2 \text{кг}^{-1} \times 10^{-3}$). Этот показатель широко варьирует для обоих радионуклидов, обнаруживая лишь тренд к снижению в области высоких уровней загрязнения. Такое снижение определяется как особенностями физико-химического состояния радионуклидов в почвах, так и барьерно-регулирующими механизмами, формирующимися в процессе эволюции (Позолотина и др., 2008).

Для более детальной характеристики накопительной способности отдельных видов травянистых растений оценили величины коэффициентов перехода ^{90}Sr и ^{137}Cs в каждой обследованной зоне. При такой оценке вариабельность величин КП будет обусловлена, прежде всего, межпопуляционной изменчивостью вида, обитающего на довольно протяженной территории. Анализ полученных данных (табл. 1) показал, что коэффициенты вариации КП ^{90}Sr для изученных видов изменяются в широких пределах (от 13.0 до 127.5%). Значительная вариабельность этого признака установлена также для одного и того же вида, произрастающего в разных зонах, (лопух паутинистый, череда трехраздельная). Можно предположить, что для этих видов растений характерен высокий уровень межпопуляционной изменчивости, обусловленной особенностями структурной организации популяций. В то же время, судя по величинам коэффициентов вариации КП ^{90}Sr , минимальной межпопуляционной изменчивостью обладает крапива двудомная. Независимо от места произрастания для большинства обследованных растений уровни вариабельности КП ^{137}Cs приближаются к 100% или превосходят эту величину, отражая

определяющий вклад межпопуляционной изменчивости в асимметричный характер распределения признака. Для всех видов и условий их произрастания КП ^{90}Sr выше, чем ^{137}Cs . Следует подчеркнуть, что почвенно-экологические условия разных зон в большей степени влияют на процессы поступления ^{137}Cs в растения, чем ^{90}Sr . При этом различия в величинах коэффициентов перехода ^{137}Cs в растения достигают двух порядков величин.

Для оценки внутривидовой изменчивости накопительной способности растений в отношении ^{90}Sr и ^{137}Cs , был проведен специальный отбор (5 повторностей) некоторых видов на ограниченной территории ВУРСа со средней плотностью загрязнения почв 13.2 и 0.5 МБк/ m^2 соответственно для ^{90}Sr и ^{137}Cs . Данные табл. 2 выявляют значительные различия в накоплении ^{90}Sr обследованными видами растений. Обращает внимание высокое содержание этого радионуклида в клевере среднем и крапиве двудомной, а наиболее низкое – в кострече безостом. Это подтверждает ранее сформированные представления о влиянии видовых особенностей растений на их способность концентрировать ^{90}Sr – химический аналог стабильного кальция. В пределах одной популяции для растений одного вида также отмечается высокая изменчивость этого признака. Так, у чины луговой и щавеля конского разница между максимальным и минимальным содержанием ^{90}Sr составила 24 и 14 раз при коэффициентах вариации 92.9 и 84.4% соответственно. Высокое внутривидовое разнообразие одного вида растений по аккумуляции ^{90}Sr , отмечено также в работе (Железнов и др., 2002). Видовая специфичность растений в отношении ^{137}Cs проявляется в меньшей степени (табл. 2). В соответствии с относительно невысоким содержанием его в почве удельная активность ^{137}Cs в большинстве травянистых растений обследованной выборки варьировала в узких пределах: 6-22 Бк/кг.

Наиболее высокая концентрация этого радионуклида (130 и 305 Бк/кг) обнаружена в представителях семейства бобовых (чина луговая и клевер средний). Внутривидовые различия между особями по их способности накапливать ^{137}Cs также невелики. Она изменяется, как правило, в 2-3 раза при коэффициентах вариации 35-62%. Исключение составляет чина луговая, для которой эта величина достигает 117.8%.

Таблица 1 – Статистические характеристики коэффициентов перехода радионуклидов в растения из почв, $\text{м}^2 \text{кг}^{-1} \times 10^{-3}$

| Вид | n | ^{90}Sr | | | | ^{137}Cs | | | |
|-------------------------------|----|------------------|---------------------------|----------|-------|-------------------|---------------------------|----------|-------|
| | | min-max | $\bar{x} \pm m_{\bar{x}}$ | σ | CV, % | min-max | $\bar{x} \pm m_{\bar{x}}$ | σ | CV, % |
| БУРС | | | | | | | | | |
| Крапива двудомная | 19 | 4.0-21.7 | 12.2±1.1 | 4.7 | 38.5 | 0.15-4.6 | 1.4±0.3 | 1.27 | 90.7 |
| Щавель конский | 9 | 0.7-16.4 | 6.7±1.9 | 5.4 | 80.6 | 0.19-1.50 | 0.80±0.15 | 0.42 | 52.5 |
| Таволга вязолистная | 8 | 0.6-4.2 | 2.6±0.5 | 1.3 | 50.0 | 0.07-1.4 | 0.60±0.18 | 0.48 | 80.0 |
| Тысячелистник обыкновенный | 9 | 1.2-16.4 | 4.0±1.8 | 5.1 | 127.5 | 0.13-1.8 | 0.60±0.20 | 0.57 | 95.0 |
| Бодяк щетинистый | 9 | 1.0-14.4 | 7.9±1.6 | 4.5 | 57.0 | 0.03-1.8 | 0.40±0.20 | 0.57 | 142.5 |
| Лопух паутинистый | 5 | 1.8-4.9 | 3.7±10.7 | 1.4 | 37.8 | 0.06-0.83 | 0.40±0.17 | 0.34 | 85.0 |
| Тростянка овсяницеvidная | 5 | 0.7-6.6 | 2.8±1.3 | 2.6 | 92.9 | 0.25-0.75 | 0.50±0.11 | 0.22 | 44.0 |
| Ракитник русский | 5 | 3.9-5.4 | 4.6±0.3 | 0.6 | 13.0 | 0.02-0.14 | 0.08±0.03 | 0.06 | 75.0 |
| Медуница мягкая | 6 | 19.0-30.9 | 25.1±2.1 | 4.7 | 18.7 | 0.60-0.83 | 0.71±0.04 | 0.09 | 12.7 |
| Пойма р. Течи | | | | | | | | | |
| Крапива двудомная | 14 | 1.6-23.3 | 12.0±1.8 | 6.5 | 54.2 | 0.01-0.26 | 0.08±0.02 | 0.07 | 87.5 |
| Щавель конский | 9 | 2.0-6.4 | 4.6±0.5 | 1.4 | 30.4 | 0.10-0.55 | 0.20±0.06 | 0.17 | 85.0 |
| Черда трехраздельная | 5 | 1.7-37.2 | 14.7±7.6 | 15.2 | 103.4 | 0.01-0.18 | 0.06±0.04 | 0.08 | 133.3 |
| Лапчатка гусиная | 4 | 3.7-11.5 | 7.8±2.2 | 3.8 | 48.7 | 0.03-0.14 | 0.07±0.03 | 0.05 | 71.4 |
| Лопух паутинистый | 4 | 4.6-29.7 | 12.1±7 | 12.1 | 100.0 | 0.002-0.11 | 0.04±0.03 | 0.06 | 150.0 |
| Зона жидких сбросов БАЭС | | | | | | | | | |
| Крапива двудомная | 8 | 2.4-9.7 | 5.7±1.0 | 2.6 | 45.6 | 1.5-20.6 | 7.2±2.5 | 6.6 | 91.7 |
| Черда трехраздельная | 6 | 4.7-17.5 | 11.1±2.3 | 5.1 | 45.9 | 0.5-4.1 | 1.6±0.6 | 1.3 | 81.3 |
| Таволга вязолистная | 7 | 1.0-25.9 | 9.6±3.8 | 9.3 | 96.9 | 0.05-3.9 | 2.1±0.6 | 1.5 | 71.4 |

Таблица 2 – Статистические характеристики удельной активности радионуклидов в растениях (Бк/кг) на ограниченной территории ВУРСа

| Вид | min-max | $\bar{x} \pm m_{\bar{x}}$ | σ | CV, % |
|-------------------------|---------------|---------------------------|----------|-------|
| ⁹⁰ Sr | | | | |
| Пустырник пятилопастный | 9038-31080 | 23060±4730 | 9460 | 41.0 |
| Кострец безостый | 1596-7838 | 5528±1339 | 2678 | 48.4 |
| Клевер средний | 228000-591600 | 419260±78025 | 156050 | 37.2 |
| Крапива двудомная | 21360-107044 | 71876±18387 | 36774 | 51.2 |
| Лопух паутинистый | 3907-21341 | 8114±3741 | 7482 | 92.2 |
| Чина луговая | 3504-85496 | 37888±17595 | 35190 | 92.9 |
| Щавель конский | 1056-14877 | 7028±2966 | 5932 | 84.4 |
| ¹³⁷ Cs | | | | |
| Пустырник пятилопастный | 5.8-17.2 | 10.0±2.4 | 4.8 | 48.0 |
| Кострец безостый | 3.1-7.7 | 5.7±1.0 | 2.0 | 35.1 |
| Клевер средний | 193-530 | 304.8±72.3 | 144.6 | 47.4 |
| Крапива двудомная | 6.9-39.1 | 22.2±6.9 | 13.8 | 62.2 |
| Лопух паутинистый | 8.4-28.2 | 14.0±4.2 | 8.4 | 60.0 |
| Чина луговая | 23.0-390.5 | 133.8±78.8 | 157.6 | 117.8 |
| Щавель конский | 3.9-9.3 | 6.4±1.2 | 2.4 | 37.5 |

Таким образом, в широком диапазоне качественного и количественного радионуклидного загрязнения почв концентрация ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в отдельных видах растений и в целом в разнотравье изменяется в соответствии со степенной функцией. При этом, величины коэффициентов перехода, характеризующие аккумулирующую способность растений с учетом плотности загрязнения почв, варьируют в широких пределах, обнаруживая тренд снижения при наиболее высоких уровнях загрязнения эдафической среды. Коэффициенты перехода ¹³⁷Cs в растения существенно различались в зависимости от почвенно-экологических условий разных обследованных зон. Соответственно межпопуляционные различия в способности одного вида растений накапливать ¹³⁷Cs выше, чем различия по этому признаку в пределах одной популяции.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта № 09-М-24-2001 в проекте

поддержки междисциплинарных фундаментальных исследований УрО РАН

ЛИТЕРАТУРА

1. Железнов А.В., Железнова Н.Б., Сметанин Н.И., Сухановская В.С. Внутри-популяционная изменчивость некоторых видов луговых растений по их способности концентрировать ⁹⁰Sr // Генетика, 2002. Т. 38. №5. С. 635-640.
2. Корнеев Н.А., Сироткин А.Н. Итоги и проблемы радиэкологического мониторинга в кормопроизводстве и животноводстве // С-х биология, 1986. №7. С. 51-59.
3. Позолотина В.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Михайловская Л.Н., Антонова Е.В. Современное состояние наземных экосистем Восточно-Уральского радиоактивного следа: уровни загрязнения, биологические эффекты. Екатеринбург. Изд-во Гошицкий, 2008. 203 с.
4. Щеглов А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах. М.: Наука, 2000. 267 с.

**ЯДРОЛЫҚ-ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ КЕШЕНДЕРДЕГІ КӘСПОРЫНДАРДЫҢ
ПАЙДАЛАНУ НӘТИЖЕСІНДЕГІ ЛАСТАНҒАН ТОПЫРАҚТАРДАҒЫ
ӨСІМДІКТЕРДЕГІ ⁹⁰Sr МЕН ¹³⁷Cs ШОҒЫРЛАНУЫ
Е.Н. Караваева, Л.Н. Михайловская, И.В. Молчанова, В.Н. Позолотина**

Топырақтың кең мөлшерде радионуклидті ластануы сандық және сапалық концентрациясы ⁹⁰Sr және ¹³⁷Cs жекелеген өсімдіктер түрі мен барлық әр-түрлі шөптерде

қызметінің деңгейіне сәйкес өзгереді. Топырақтың оң жоғарғы ластану деңгейінде трендтің азаюын таба отырып, кең мөлшерде коэффициенттердің су аралығы түрленді. Өсімдіктегі ^{137}Cs коэффициентінің аралығы әр- түрлі зерттелінген белдеулердегі топырақ-экологиялы жағдайына тәуелділігіне байланысты өзгешеленді. Биопуляция аралығындағы осы белгілердің айырмашылығына қарағанда бір өсімдік түрінің жинақтау қабілеттілігі популяция аралық айырмашылыққа сәйкес ^{137}Cs жоғары жинақтайды.

THE ^{90}Sr AND ^{137}Cs ACCUMULATION BY HERBS FROM SOILS CONTAMINATED AS
RESULT THE OPERATION OF NUCLEAR FUEL PLANTS

E.N. Karavaeva, L.N. Mikhaylovskaya, I.V. Molchanova, V.N. Pozolotina

Into wide gradient of quantitative and qualitative radionuclides contamination the content of ^{90}Sr and ^{137}Cs in individual species of herbaceous plants and on the whole in herbs are described by power function. The radionuclides transfer coefficients are varied in wide limits revealed lowering trend at high levels of the soils contamination. It is showed that interpopulation differences in the accumulation of ^{137}Cs one and the same species are higher than that the differences on this sign into limits of one population.