

## РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЛАНДШАФТНО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Величкин В.И.<sup>1</sup>, Асадулин Э.Э.<sup>1</sup>, Дергачева А.В.<sup>1</sup>, Мирошников А.Ю.<sup>1</sup>, Надъярных Г.И.<sup>1</sup>, Семенков И.Н.<sup>1</sup>, Усачева А.А.<sup>1</sup>, Малышкин А.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН, Москва, Россия)*

<sup>2</sup> *Судоремонтный завод «Нерпа» ОАО «ЦС «Звездочка» (Снежногорск, Россия)*  
[almir@igem.ru](mailto:almir@igem.ru)

**Введение.** Кольский полуостров – один из важнейших стратегических регионов Российской Федерации в Арктике. Здесь расположен единственный незамерзающий северный порт страны – Мурманск, являющийся базой Северного флота ВМФ России. В состав флота входят атомные подводные лодки (АПЛ) и пункты их базирования, являющиеся ядерными и радиационно-опасными объектами. Кроме того, вблизи г. Снежногорск, расположенного в 30 км севернее Мурманска, находится судоремонтный завод (СРЗ) «Нерпа», осуществляющий ремонт и утилизацию АПЛ, а также объекты СевРАО – пункт длительного хранения реакторных отсеков (ПДХ РО) в губе Сайда и отделение губа Андреева.

Большая концентрация в северной части Кольского полуострова потенциальных и действующих источников радиационного загрязнения, а также высокая уязвимость тундровых и лесотундровых ландшафтов к техногенным нагрузкам, в том числе радиационным, определяют необходимость изучения радиоэкологического состояния территории.

**Актуальность исследований.** Одним из надежных маркеров радиоактивного загрязнения и главным искусственным дозообразующим радионуклидом является цезий-137. Уровни его удельной активности в природных элементарных ландшафтно-геохимических системах Кольского полуострова детально изучены сотрудниками ИГЕМ РАН в 2005 – 2008 гг. [1, 2, 7, 15].

Однако до сих пор недостаточно исследованы вопросы, связанные с миграцией <sup>137</sup>Cs в городских ландшафтах и каскадных ландшафтно-геохимических системах Кольского полуострова. Свойства городских почв Заполярья к настоящему времени практически не изучены [4], поэтому любые исследования подобного рода могут быть использованы для уточнения классификации антропогенных почв и разработки моделей начальных стадий почвообразования в ландшафтах Севера.

В связи с запланированным расширением атомного ледокольного флота в 2015 – 2017 гг. возрастает риск загрязнения арктических экосистем радионуклидами. Для разработки мер по снижению негативных последствий намечаемой деятельности необходимо определение исходного состояния экосистем по результатам фоновому ландшафтно-геохимического мониторинга. Первоочередной целью такого мониторинга является анализ современного состояния фоновых и загрязненных территорий западного сектора Арктики как наиболее динамично развивающегося.

Исследование фоновых территорий дает информацию о потенциале экосистемы к самоочищению, условиях миграции и аккумуляции радионуклидов, позволяет выделять зоны повышенной миграции и природные геохимические барьеры. Изучение загрязненных территорий дает информацию об уровнях устойчивости отдельных экосистем и емкости геохимических барьеров. Одновременное комплексное изучение фоновых и загрязненных

территорий является необходимым для достоверной оценки устойчивости экосистем Севера в условиях интенсивного освоения и прогнозирования изменения их состояния.

Целью исследований является изучение закономерностей миграции и аккумуляции радиоцезия в городских и природных ландшафтах запада Кольского полуострова.

#### **Объекты и методы исследований.**

В 2014 году работы проводились по трем направлениям:

1. Анализ аэрогенного загрязнения радионуклидами территории в пределах 50-км зоны вокруг СРЗ «Нерпа»;
2. Изучение радиальной и латеральной миграции цезия-137 в природных каскадных и элементарных ландшафтно-геохимических системах;
3. Оценка радиационного состояния почв города Снежногорска.

Аэрогенное загрязнение радионуклидами изучено путем мониторинга состояния лишайников родов *Cladonia* и *Cetraria*, которые являются традиционными объектами для оценки состояния экосистем Арктики [5, 8, 9, 11, 12].

В ходе полевых работ 2014 года на 24 точках (в том числе на 18 мониторинговых участках, заложенных в 2005 – 2008 гг.) собрано 11 проб кладонии и 19 проб цетрарии (рис. 1). Кроме того, в работе использованы данные СРЗ «Нерпа» по мониторингу атмосферных выпадений  $^{137}\text{Cs}$  за 2006 – 2013 гг. В среднем, за год выпадает 2,5 – 4,6 Бк/м<sup>2</sup> цезия-137. Повышенный уровень выпадений (51,8 Бк/м<sup>2</sup>) зафиксирован в 2009 году.



РИС-1-СХЕМА.jpg

Рис. 1. Схема отбора лишайников родов *Cladonia* и *Cetraria* в пределах 50-ти километровой зоны вокруг судоремонтного завода «Нерпа».

Поведение цезия-137 в природных ландшафтах изучено на примере ключевого участка, находящегося в 1 км к северо-западу от СРЗ «Нерпа», который представлен сопряженным рядом ландшафтов типичной для данной территории сопки. От вершины сопки, высотой 116 м, к ее подножию заложен ландшафтно-геохимический профиль, в пределах которого на 6 точках сделаны физико-географические описания растительного и почвенного покрова, а также выполнено их опробование для изучения поведения цезия-137 в сопряженном ряду ландшафтов.

Вершина сопки и верхняя часть ее склонов покрыты голубично-шикшево-беломошным сообществом, произрастающем на подбурях иллювиально-гумусовых, сформировавшихся на гранито-гнейсах фундамента (рис. 2).



РИС-2-ПРОФ.jpg

Рис. 2. Ландшафтно-геохимический профиль через сопку.

Средняя часть сопки занята висячим болотом. Его центральная часть покрыта осоково-хвощово-сфагновым сообществом на торфяной олиготрофной почве, а периферийная шикшево-осоковым зеленомошно-сфагновым на торфяной олиготрофной остаточно-эутрофной почве.

Склоны сопки, расположенные ниже висячего болота, покрыты березняком ерниково-осоковым беломошно-зеленомошно-долгомошным, произрастающим на подзолах иллювиально-железисто-гумусовых. Сопка обрывается к бухте Кут Оленьей губы

Кольского залива крутыми склонами крутизной около  $20^{\circ}$ , осложненными небольшими (шириной до 5 м) наклонными террасами с уклоном около  $5^{\circ}$ . Здесь на валунах диаметром 30 – 300 см произрастает разреженный березняк кустарничково-беломошный. Незадернованные выходы скальных пород занимают около 50% территории, на остальных участках мощность мелкоземистого и торфянистого материала не превышает 5 см.

Городские почвы изучены в пределах г. Снежногорск, который основан в конце 60-х гг. XX века. В настоящий момент в пределах города выделяется 3 функциональные зоны: рекреационная, селитебная и транспортная. Рекреационная зона – это традиционно используемая природная или специально организованная территория, где жители населенного пункта проводят часы досуга. Применительно к г. Снежногорск рекреационная зона была разделена на лесопарковую и парковую. К первой отнесены городские территории с лесопосадками и трансформированными естественными лесами, к парковой – спортивные и детские площадки, клумбы.

Селитебная зона представлена районами города с жилищной застройкой. В ней запрещено строительство промышленных, транспортных и иных предприятий, загрязняющих окружающую среду [3]. Первые многоэтажные дома, сохранившиеся до настоящего времени, построены в начале 70-х гг. XX века. Большая часть жилых и административных зданий возведена в конце 70-х – начале 80-х гг. XX века. Селитебная зона г. Снежногорск представлена пяти- и девятиэтажными домами, расположенными на удалении 5 – 40 м друг от друга. Разрезы в пределах селитебной зоны закладывали вблизи домов на клумбах и газонах.

Под транспортной зоной авторы понимают территории, отведенные под дороги, а также места стоянок транспортных средств и участки вблизи от остановок общественного транспорта.

Разрезы в городских и природных ландшафтах заложены в пределах наиболее представительных территорий. На ландшафтно-геохимическом профиле заложено 5 разрезов и отобрано 38 проб, в г. Снежногорск – 26 разрезов и 79 образцов. На ненарушенном участке передней стенки каждого разреза проводили укос мохово-травянисто-кустарничкового яруса с фиксированной площади (от 410 до 4000 см<sup>2</sup>) для получения образцов массой не менее 300 граммов. Мохово-травянисто-кустарничковый ярус опробовали для сравнения запасов цезия-137 в нем и в органогенных горизонтах почв. Почвенные образцы получали также с передней стенки разреза после сбора пробы растительности. Сплошной послойной отбор проб (n=87) выполнен от поверхности почвы до нижней границы гумусово-аккумулятивного горизонта в минеральных почвах и на всю мощность органогенной толщи в торфяных, которая варьировала в связи с разным положением уровня грунтовых вод. Для расчета запасов цезия-137 отбор этих проб проводили из фиксированного объема с учетом границ между генетическими горизонтами почв. Мощность слоя варьировала от 5 см в природных торфяных прослоях и городских почвах до 2 см в минеральных горизонтах подбуров и подзолов. Площадь отбора определялась необходимостью получения образца массой не менее 200 граммов и составляла от 58 см<sup>2</sup> в минеральных горизонтах до 4000 см<sup>2</sup> в органогенных. Из минеральных горизонтов образцы отбирали из каждого генетического горизонта для последующей характеристики условий радиальной миграции и уточнения классификационной принадлежности почв.

В первую очередь цезий-137 определяли в приповерхностных образцах. По достижении величины удельной активности 3 Бк/кг в органо-минеральных и минеральных образцах в нижележащей минеральной толще определение цезия-137 не проводили. Удельная

активность  $^{137}\text{Cs}$  определена в 130 пробах  $\gamma$ -спектрометрическим методом на Ge(Li)-детекторе GEM-4519 (GLP-25300/13) и 8000-канальном амплитудном анализаторе 919 EG&G ORTEC (предел детектирования 1 Бк/кг) в лаборатории радиогеологии и радиогеоэкологии ИГЕМ РАН (аналитик Р.В.Соломенников). Контроль измерений осуществлен на сцинтилляционном  $\gamma$ - $\beta$ -спектрометрическом комплексе, оснащённом NaI(Tl)-детекторами 160×160 мм с колодцами 55×110 мм.

### Результаты и их обсуждение.

#### 1. Цезий-137 в природных ландшафтно-геохимических системах западной части Кольского полуострова.

Максимальная плотность загрязнения цезием-137 (1,7 кБк/м<sup>2</sup>) свойственна ландшафтам вершин сопки (рис. 2). В ландшафтах верхней и нижней части склонов, где развиты альфегумусовые почвы, она снижается до 1,1 кБк/м<sup>2</sup>. Минимальные уровни плотности загрязнения (0,2 – 0,4 кБк/м<sup>2</sup>) свойственны ландшафтам висячих болот, откуда цезий-137 выносятся в морские аквальные ландшафты.

Максимальная удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  (100 – 170 Бк/кг) и плотность загрязнения (540 – 900 Бк/м<sup>2</sup>) обнаружены в верхних органогенных горизонтах альфегумусовых почв – подзолов и подбуров (рис. 3). Значения этих показателей с глубиной экспоненциально снижаются, что типично для слабо подвижных поллютантов, поступающих в ландшафты в результате атмосферных выпадений [1, 2, 7, 13, 14]. Цезий-137 в подбурях и подзолах распространился до глубины 15 см. Ниже его значимые количества отсутствуют.



РИС-3-ПОЧВЫ.jpg

Рис. 3. Радиальное распределение удельной активности цезия-137 в почвах Кольского полуострова: Пб – подбуры, То – торфяные олиготрофные, По – подзолы.

В мохово-травянисто-кустарничковом ярусе удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  и плотность загрязнения ниже, чем в верхних слоях почв: 20 – 35 Бк/кг и 20 – 30 Бк/м<sup>2</sup>. В живом мхе значения этих показателей выше, чем в кустарничках, что ранее отмечалось для фоновых северотаежных ландшафтов Западной Сибири [10].

В отличие от альфегумусовых почв, где цезий-137 находится исключительно в верхней 15-ти сантиметровой толще, в торфяных олиготрофных почвах центра висячего болота установлено проникновение радионуклидов на глубину более 25 см. Повышенная миграционная способность  $^{137}\text{Cs}$  отмечалась ранее как для почв Кольского полуострова, так и для почв с низкими значениями актуальной кислотности (меньше 4,5 единиц pH) для иных территорий [1, 2, 13, 14].

Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в пробах лишайников родов *Cladonia* и *Cetraria* аналогична уровням этого показателя в смешанных образцах наземной фитомассы мохово-травянисто-кустарничкового яруса и варьирует в пределах 10 – 45 Бк/кг, что типично для Кольского полуострова и фоновых ландшафтов северной тайги Западной Сибири [7, 10]. Коэффициент варируемости удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в лишайниках родов *Cladonia* и *Cetraria* равен 25 и 22% соответственно.

Удельная активность цезия-137 в лишайниках родов *Cladonia* и *Cetraria*, собранных в 2014 г. на точках мониторинговой сети 2005 – 2008 гг. [7], снизилась, в среднем, в 1,9 раз (n=20) с учетом радиоактивного распада (рис. 4). Вероятно, повышенная активность, зафиксированная в образцах, полученных в 2005 – 2008 годах, объясняется свежим аэрогенным загрязнением слоевищ лишайников мелкодисперсными частицами,

сорбировавшими радионуклиды, которые впоследствии были смыты с поверхности организмов атмосферными осадками, а поступление нового загрязнения уже не происходило, т.к. к этому времени период интенсивной утилизации АПЛ на СРЗ "Нерпа" был завершен.



РИС-4-ЛИШАЙ.jpg

Рис. 4. Удельная активность цезия-137 в пробах лишайниках родов *Cladonia* (к) и *Cetraria* (ц), отобранных: 1 – в 2014 г.; 2 – в 2005–2008 гг. с одних и тех же участков.

## 2. Цезий-137 в городских почвах.

В почвенном покрове города Снежногорска установлено доминирование антропогенных почв и их приуроченность к так называемым геогенным зонам – участкам, где наблюдаются наиболее благоприятные условия для формирования почв. На городских территориях главным фактором почвообразования является антропогенная деятельность, в результате которой на коренных гранито-гнейсовых породах образуются почвоподобные тела с заданными свойствами, в последствии образующие почвы определенных функциональных зон города. Так в селитебной зоне доминируют агропсаммоземы и агроземы торфяные; в транспортной – карликовые псаммоземы, в лесопарковой – гумусовые псаммоземы и стратоземы.

В почвах города Снежногорск плотность загрязнения цезием-137 варьирует от 0 до 1800 Бк/м<sup>2</sup> при среднем 265 Бк/м<sup>2</sup> (рис. 5). Максимальная плотность загрязнения <sup>137</sup>Cs (614 Бк/м<sup>2</sup>) установлена в почвах рекреационной лесопарковой зоны, что в полтора раза ниже местного фона, но в 1,4 раза превышает плотность загрязнения фоновых территорий тундровых ландшафтов Западной Сибири. На втором месте по плотности загрязнения цезием-137 находятся почвы селитебной зоны со средним уровнем 128 Бк/м<sup>2</sup>. Значительно меньшая плотность загрязнения <sup>137</sup>Cs присуща рекреационной парковой и транспортной зонам: 23 и 39 Бк/м<sup>2</sup> соответственно. Стоит отметить, что почвы города нельзя рассматривать в качестве радиоактивно загрязненных территорий, так как даже самые высокие показатели плотности загрязнения цезием-137 в 20 раз ниже законодательно установленного порога [6].



РИС-5-ГОРОД.jpg

Рис. 5. Плотность загрязнения цезием-137 почв города Снежногорск. Сплошная линия – уровень загрязнения почв, который позволяет рассматривать территорию радиоактивно загрязненной; прерывистая – средняя плотность загрязнения тундровых почв Гыданского полуострова. На графике отображен размах значений и число разрезов, по которому проведено осреднение.

В половине проб (42% от общего числа) из почвенных разрезов города Снежногорск значимой удельной активности цезия-137 (более 3 Бк/кг) не обнаружено. В четверти случаев (23%) максимальная плотность загрязнения свойственна верхней пятисантиметровой толще и слою 5 – 10 см. Лишь в 12% разрезов максимальная плотность загрязнения <sup>137</sup>Cs обнаружена глубже 10 см.

**Выводы и заключение.**

- Максимальная удельная активность и плотность загрязнения цезием-137 фиксируются в верхних органогенных горизонтах всех изученных природных и городских почв.
  - Цезий-137 выносится из ландшафтов висячих болот в морскую среду. Для анализа дальнейших путей и интенсивности миграции  $^{137}\text{Cs}$  в аквальных ландшафтах необходимо проведение специальных исследований;
  - В 2014 г. удельная активность цезия-137 в лишайниках родов *Cladonia* и *Cetraria* в 1,3 – 3,0 раз ниже по сравнению с уровнями, зафиксированными в 2005 – 2008 гг.;
  - Впервые на большом фактическом материале (26 почвенных разрезов) изучен почвенный покров города, расположенного в лесотундровых ландшафтах;
  - За 50 лет в г. Снежногорске полностью изменён почвенный покров с использованием привозных материалов, что определило пониженную плотность радиоактивного загрязнения цезием-137 по сравнению с окружающими природными территориями;
  - Впервые получены данные, указывающие на улучшение экологической ситуации в урбанизированной территории по сравнению с неосвоенной.
- Деятельность судоремонтного завода «Нерпа», связанная с радиационно-опасными производственными процессами, оказывает приемлемый уровень воздействия на окружающие ландшафты. Радиоэкологическая ситуация в пределах 50-ти километровой зоны вокруг судоремонтного завода «Нерпа» может быть охарактеризована как вполне удовлетворительная.

#### Список литературы:

1. В.И. Величкин, Е.Н. Борисенко, А.Ю. Мирошников, В.И. Мыскин, Н.В. Кузьменкова, И.И. Чуднявцева. *Кн. Геохимия ландшафтов и география почв*, 2012, 316–344.
2. В.И. Величкин, Н.В. Кузьменкова, Н.Е. Кошелева, А.Ю. Мирошников, Э.Э. Асадулин, Т.А. Воробьева. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*, 2012, **1**, 41–50.
3. И.И. Дедю. *Экологический энциклопедический словарь*, 1989, электронный ресурс, <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ecolog/6655/>.
4. А.А. Дымов, Д.А. Каверин, Д.Н. Габов. *Почвоведение*, 2013, **2**, 240 – 248.
5. А.В. Евсеев, В.С. Тикунов. *Экология*, 1990, **2**, 3.
6. Закон РФ № 1244-1 от 15.05.1991 г., электронный ресурс, <http://base.garant.ru/185213/#text>.
7. Н.В. Кузьменкова. *Вестник МГУ. Серия 5*, 2009, **2**, 32–37.
8. М.Г. Опекунова, М.Ю. Гизетдинова. *Вестник СПбГУ. Серия 7*, 2014, **1**, 79–94.
9. М.Г. Опекунова, А.Ю. Опекунов, С.Ю. Кукушкин, И.Ю. Арестова. *Вестник СПбГУ. Серия 7*, 2007, **1**, 124–127.
10. И.Н. Семенов, А.А. Усачева *Фундаментальные исследования*, 2013, **7 (10)**, 1475–1481.
11. В.Д. Страховенко, Б.Л. Щербов, Е.И. Хожина. *Геология и геофизика*, 2005, **46 (2)**, 206–216.
12. В.Д. Страховенко, Е.И. Хожина, Б.Л. Щербов. *Геохимия*, 2008, **2**, 141–150.
13. А.И. Щеглов. *Кн. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах*, 2000, 268 с.
14. А.И. Щеглов, О.Б. Цветнова, Л.Г. Богатырев. *Сб. Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин*. 2005, **6**, 248–268.
15. N. Kuzmenkova, A. Miroshnikov, T. Vorobyova. *Radioprotection*, 2009, **44 (5)**, 103–106.