УДК 504.75.05 10.56564/27825264_2025_3_19

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАММА-ПОЛЯ НА ТЕРРИТОРИИ ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАПОВЕДНИКА: ПОКАЗАНИЯ ПЕРЕНОСНЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ

А. А. Екидин [1], Д. Д. Десятов [1], Е. И. Назаров [1], М. Д. Пышкина [1], К. Л. Антонов [1], А. В. Пыхова [2], А. Р. Зигангиров [3]

[1] Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
[2] Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия
[3] ООО «Агентство экологической безопасности «АЛЬФА-Х91»

Цикл публикаций будет посвящен результатам полевых исследований от планирования до оценки актуального значения активности радионуклидов в грунтах и почвах Восточно-Уральского государственного заповедника. В данной статье представлены этапы планирования и выполнения полевых исследований, позволившие получить представительные результаты, характеризующие радиоэкологическую ситуацию на площади более 14 тыс. га. Материал статьи сформирован на основании записей полевых журналов, в которых фиксировались результаты показаний поверенных средств измерения радиационных параметров гамма-поля. Из первичного материала исключены некорректные записи, не превышающие 1,2 % от совокупности данных по 170 точкам измерения in situ и точкам отбора проб почвы. Каждая точка измерения с фиксированными координатами характеризует единичный участок заповедника и прилегающей к нему территории площадью ~1,22 км^2. Выполнена графическая визуализация результатов планирования полевых исследований для понимания представительности полученных первичных данных. Измеряемые параметры в каждой точке включают отдельные параметры: мощность амбиентного эквивалента дозы на поверхности почвы и на высоте ~1 м над поверхностью (нЗв/ч); удельную активность цезия-137 и естественных радионуклидов (Бк/кг). Определены статистические характеристики каждого параметра: форма распределения, диапазоны значений, средние и медианные величины. Рассмотрены корреляционные зависимости между параметрами и построены модели простой линейной регрессии.

Ключевые слова: Восточно-Уральский радиоактивный след; ядерное наследие; заповедник; мощность амбиентного эквивалента дозы; гамма-излучение; удельная активность; цезий-137; профиль; точка измерения; полевой спектрометр.

1. Введение

Из более чем двух тысяч объектов ядерного наследия 1 % представлен территориями с радиоактивным загрязнением различной площади [1]. Размеры участков загрязнения, содержание радиоактивных веществ и активность отдельных нуклидов в компонентах объекта определяют потенциальную опасность для населения и окружающей среды [2]. Для определения и/или актуализации сведений, определяющих потенциальную радиационную опасность любого объекта ядерного наследия, осуществляются комплексные радиационные обследования. Объем и методы таких обследований зависят от особенностей каждого объекта, причин его формирования и условий его функционирования. В отличие от других типов

радиационно опасных объектов, территориям с радиоактивным загрязнением присущи специфические особенности:

– отсутствие проектных инженерных барьеров безопасности позволяет представлять такие объекты в виде площадных открытых источников ионизирующего излучения различной протяженности;

– динамика радиоактивного загрязнения и физико-химические превращения радиоактивных веществ, происходящие под влиянием локальных, региональных и глобальных естественных биотических и абиотических процессов, ограничивают возможности фиксации, дезактивации и управления перераспределением и распространением активности;

– вариабельность оценок запаса радиоактивных веществ на загрязненной территории зависит от метода и единицы масштаба обследования, которые определяются расположением и плотностью точек опробования и измерений [3];

– обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего на территориях, прилегающих к загрязненным, обеспечивается за счет их отчуждения, запрета или ограничения хозяйственной деятельности, выполнения противопожарных и противоэрозионных мероприятий, ведения радиационного мониторинга;

– отчуждение больших по площади территорий и запрет на хозяйственную деятельность ведет к восстановлению естественной природной среды, способствует поддержанию биологического разнообразия, охране редких видов растений и животных, сохранению типичных природных экосистем, что приводит к бинарному статусу охранных режимов – не только к охране населения от ранее загрязненной территории, но и биогеоценозу территории от населения.

Наиболее масштабная территория в России, подвергшаяся двукратному радиоактивному загрязнению, расположена в Уральском регионе и известна как Восточно-Уральский радиоактивный след (далее – ВУРС) [4]. В 1966 г. на части ВУРС с максимальным радиоактивным загрязнением площадью 16 670 га была установлена заповедная зона (см. Приложение)[1]. Основная цель создания заповедной зоны – обеспечение радиационной безопасности населения. В отличие от других заповедных зон, функционирование Восточно-Уральского государственного заповедника (далее – ВУГЗ) было направлено на защиту населения от данной территории, а не территории от населения. До 1991 г. заповедник был структурным подразделением Опытной научно-исследовательской станции (далее – ОНИС). Для достижения цели планировались и осуществлялись следующие задачи:

– реализация комплекса мероприятий по предотвращению выноса радионуклидов за пределы зоны отчуждения;

– осуществление контроля радиационной обстановки;

– защита лесных насаждений от пожаров, вредителей и болезней;

– апробация технологий и мероприятий по реабилитации загрязненных территорий.

Сопутствующие задачи по информационному и научно-техническому сопровождению режима отчуждения территории включали:

– научные исследования в области радиоэкологии и радиобиологии;

– мониторинг природной среды, растительного и животного мира;

– изучение животного и растительного мира, типичных и уникальных экосистем и ландшафтов;

[1] Постановление Совета министров РСФСР от 29 апреля 1966 года № 384-20 «Об организации Восточно-Уральского заповедника на территории Челябинской области».

– восстановление естественного состояния биогеоценозов в связи со снятием антропогенной нагрузки;

– обеспечение естественного развития экосистем, характерных для региона расположения заповедных зон, сохранение биологического разнообразия животного и растительного мира.

Систематические исследования и постоянный радиационный мониторинг позволяли ОНИС контролировать радиационное воздействие ВУГЗ на сопредельные территории. Планомерные исследования ОНИС, проведенные в этой зоне, заложили основы фундаментальной радиоэкологии и были использованы для разработки практических рекомендаций по ликвидации последствий радиационных аварий [5–7]. Значительная площадь ВУГЗ, отсутствие антропогенной нагрузки, неравномерное загрязнение различных участков, разнообразие ландшафтов и экосистем сформировали уникальный полигон для решения актуальных проблем радиоэкологии и радиобиологии. Вместе с тем, отсутствие комплексной программы исследований, единого открытого депозитария данных полевых наблюдений и измерений не позволяет в полной мере реализовать потенциал территории ВУГЗ для фундаментальных научных исследований в изучении устойчивости организмов и экосистем в условиях естественных и антропогенных воздействий[1]. Опыт ВУГЗ недостаточно востребован для прогнозирования возможностей и обоснования подходов хозяйственного использования радиоактивно загрязненных земель, разработки мер снижения рисков для населения, противодействия техногенным и биогенным угрозам[2].

В настоящее время каждая группа специалистов при планировании и постановке целей полевых исследований на ВУРС опирается на собственный опыт, локальный массив первичных и обработанных данных, как правило, закрытых для широкого использования, и доступную информацию в форме научных публикаций. Материалы полевых исследований обширной территории с различной плотностью радиоактивного загрязнения сложно изложить в рамках одной научной публикации без потери отдельных массивов полученных данных и результатов их анализа. Сохранить и передать заинтересованным специалистам первичные данные без искажения и существенного сокращения для решения своих исследовательских задач позволит цикл статей, объединенных одной целью – определить актуальные характеристики радиационной ситуации на территории ВУГЗ.

Цель представленной работы – сформировать массив первичных данных статистических характеристик гамма-поля на территории ВУГЗ. Материал может быть использован заинтересованными специалистами для планирования исследований на территории ВУГЗ, а также для оценки воспроизводимости и, следовательно, достоверности представленных данных при применении аналогичных средств измерений. Для повышения эффективности применения результатов полевых обследований и их интерпретации в статье указаны координаты планируемого и реального местоположения каждой стационарной точки, что обеспечивает графическое представление о радиоэкологической ситуации [8]. Подробное описание методических подходов и решаемых задач при планировании полевых исследований обширной по площади территории необходимо для прослеживаемости, транспарентности и беспристрастности полученных первичных данных.

[1] Распоряжение Правительства РФ от 31.12.2020 N 3684-р (ред. от 21.04.2022) «Об утверждении Программы фундаментальных научных исследований в РФ на долгосрочный период (2021–2030 годы)».

[2] Приоритеты и перспективы научно-технологического развития РФ (Указ Президента РФ от 28.02.2024 № 145 «О Стратегии научно-технологического развития РФ»).

2. Материалы и методы полевых исследований

Полевые исследования, позволяющие получить представительные результаты измерений радиационных параметров окружающей среды для объективной характеристики радиоэкологической ситуации на обследуемой территории, предусматривают:

– сбор и анализ информации об объекте исследования для выбора средств измерений (далее – СИ), планирование маршрутов – площадь и ландшафтные характеристики обследуемой территории, специфические особенности ее радиоактивного загрязнения;

– оценку доступных ресурсов для реализации целей исследований: необходимого времени на исследования, возможности участия специалистов и их компетенции, средств измерений, сопутствующих материалов и оборудования;

– оценку достижимого объема исследований: измеряемые параметры, их количество и распределение по площади обследования;

– разработку формы и ведения записей для фиксирования измеряемых параметров и сопутствующей информации каждого измерения: единицы измерения, коды, хронология;

– планирование и выполнение маршрутов прохождения профилей;

– заполнение базы данных результатов обследования;

– выбор методов анализа полученных результатов полевых исследований;

– обоснование перспективных вариантов практического применения полученных результатов.

2.1. Объект исследования

Восточно-Уральский государственный заповедник расположен в лесостепной зоне на территории Каслинского и Кунашакского районов Челябинской области. В настоящее время его площадь составляет 14 750 га (выделенная в 1966 г. площадь была пересмотрена в 2013 г.), протяженность по периметру – 90 км, с севера на юг – 24 км, с запада на восток – 9 км.

Леса занимают 70 % площади заповедника, в том числе 32 % территории занято молодыми березовыми лесами и 14 % – травянистыми растительными сообществами: лугами, болотами и степными участками [9]. Господствующий тип почв – серые лесные (65 %). На пологих склонах под березовыми лесами и суходольными лугами сформированы черноземы, выщелоченные на отложениях слабокарбонатных желто-бурых суглинков (30 %) [9].

На территории ВУГЗ расположены оз. Берендиш и Урускуль. Площадь водного зеркала оз. Берендиш – 9,9 км^2, оз. Урускуль – 4,2 км^2. С северо-запада к территории заповедника примыкает оз. Алабуга. К юго-восточной границе примыкают оз. Кожакуль и Малые Кирпичики, а к западной – оз. Малое Травяное. В центральной части заповедника имеются небольшая возвышенность и болото Кон, а северо-восточную часть занимает заболоченная пойма р. Караболки – бол. Бугай, западная и восточная границы заповедника проходя по нему. Берега озер низкие, имеют заболоченные участки.

Первоначальное радиоактивное загрязнение территории ВУРС сформировалось 29 сентября 1957 г. в результате взрыва емкости с радиоактивными отходами на химическом комбинате (ныне ФГУП «ПО «Маяк»). Выброс радиоактивных материалов составил 20 млн Ки ($7{,}4 \cdot 10^{17}$ Бк) [10]. В атмосферных выпадениях аварийного выброса основную долю активности составляли гамма-излучающие радионуклиды ^{144}Ce (66 %), ^{95}Zr (25 %), ^{106}Ru (3,7 %)

при относительно небольшом вкладе долгоживущих ^{90}Sr (5,4 %), ^{137}Cs (0,35 %) и изотопы плутония (0,0043 %) [11].

Весной 1967 г. территория заповедника была загрязнена повторно в результате переноса примерно 0,6 МКи ила и песка с берегов обмелевшего оз. Карачай, служившего ПО «Маяк» в качестве открытого хранилища радиоактивных отходов [9]. Основным загрязняющим радионуклидом был ^{137}Cs, его поступление в окружающую среду составило около $2{,}2 \cdot 10^{13}$ Бк [10, 12].

В течение времени радиационная обстановка на территории ВУГЗ меняется вследствие [13]:

- радиоактивного распада радионуклидов;
- перераспределения радиоактивных веществ в природных системах, в том числе заглубления в почве и донных отложениях;
- биогеохимической миграции радионуклидов;
- хозяйственной деятельности человека, включая мероприятия по радиационной защите населения.

В настоящее время территория заповедника загрязнена преимущественно (95,7 %) ^{90}Sr аварийных выпадений [14]. Интегральные запасы ^{90}Sr в его почвенном покрове на 2008 г. составляли $5{,}71 \cdot 10^{14}$ Бк, а ^{137}Cs – $6{,}61 \cdot 10^{13}$ Бк [15]. Пространственное распределение ^{90}Sr и ^{137}Cs в почвенном покрове территории ВУГЗ представляет собой сложный характер формирования загрязнения [16]. Оно обусловлено Кыштымской аварией и Карачаевским инцидентом. В первом случае основным загрязнителем был ^{90}Sr, а во втором − ^{137}Cs [17]. Текущие выбросы ФГУП «ПО «Маяк» в атмосферу оцениваются как незначительные в зоне центральной оси ВУРС [18].

Плотность загрязнения почв радионуклидами зависит от расстояния до эпицентра аварии, а также от расстояния до центральной оси следа. Содержание радионуклидов снижается к восточной и западной периферийм в соответствии с экспоненциальной функцией [14–16]. Характер вертикального распределения радионуклидов зависит от комплекса биотических и абиотических факторов [15]. На автоморфных элементах рельефа в почвах естественного сложения вертикальное распределение радионуклидов характеризуется наличием максимума концентрации на глубине 5–10 см. Основное количество радионуклидов (75–99 % валового содержания) в типичных для заповедника серых лесных почвах и черноземах сосредоточено в верхних гумусированных горизонтах, мощность которых составляет 20–25 см [15, 19–21]. В гидроморфных пойменных почвах с высоким уровнем увлажнения (дерновых, дерново-луговых) ^{90}Sr и ^{137}Cs распределяются более или менее равномерно до глубины 40 см [15, 22]. В ненарушенных почвах ВУРС (чернозем выщелоченный и серая лесная почва) ^{90}Sr содержится в основном в подвижных формах (водорастворимой – от 1,5 до 2,0 %, обменной – от 85 до 87 % валового содержания). ^{137}Cs находится преимущественно в необменной форме. Доля подвижного ^{137}Cs составляет от 2,5 до 7,0 % [21].

2.2. Средства измерений

Наличие в радиоактивном загрязнении на территории заповедника относительно долгоживущего гамма-излучающего радионуклида ^{137}Cs определило выбор СИ. Применяемый в рамках полевых исследований комплект СИ включал два переносных прибора на основе интеллектуальных блоков детектирования гамма-излучения с функцией определения координат точек выполнения измерения и автоматической записи данных во внутреннюю память устройства.

Для измерения мощности амбиентного эквивалента дозы (далее – МАЭД) на высоте 1 м над поверхностью почвы использовали радиационный сканер МКС-

АТ6101СМ (рис. 2.1) в конфигурации с двумя сцинтилляционными блоками детектирования гамма-излучения NaI(Tl) размерами 63 х 160 мм (БДКГ-19М). Алгоритм работы радиационного сканера обеспечивает непрерывность процесса измерения, вычисления среднего значения и оперативное представление получаемой информации на экран блока обработки информации (БОИ). БОИ имеет встроенный GPS-приемник, обеспечивающий прием географических координат, в результате чего осуществляется автоматическая привязка результатов измерений на местности. Прибор быстро адаптируется к изменению уровней радиоактивности. Система светодиодной стабилизации измерительного тракта обеспечивает стабильность измерений и проверку работоспособности всего тракта в процессе работы. Метрологические характеристики данного прибора представлены в табл. 2.1.

Рис. 2.1. Спектрометрический портативный радиационный сканер МКС-АТ6101СМ с блоком обработки информации (АТОМТЕХ, Минск)

Таблица 2.1. Метрологические характеристики радиационного сканера МКС-АТ6101СМ

Параметр	Значение
Диапазон измерений мощности дозы гамма-излучения, мкЗв/ч	От 0,03 до 50
Диапазон энергий регистрируемого гамма-излучения, кэВ	От 20 до 3 000
Относительное энергетическое разрешение спектрометров для энергии гамма-излучения 662 кэВ для радионуклида ^{137}Cs, %	не более 9,0
Эффективность регистрации спектрометров в пике полного поглощения для энергии гамма-излучения 662 кэВ для радионуклида ^{137}Cs источника типа ОСГИ-3, %	не менее 8,8
Пределы допускаемой основной относительной погрешности при измерении мощности дозы гамма-излучения, %	±20

Измерение МАЭД на поверхности почвы и измерение удельной активности (далее – УА) радионуклидов *in situ* выполнялось с помощью спектрометра МКС-АТ6101ДР (рис. 2.2). Спектрометр представляет собой портативный и многофункциональный прибор, состоящий из спектрометрического блока

детектирования гамма-излучения, размещенного в алюминиевом корпусе, и устройства обработки. Принцип действия спектрометра основан на использовании методов сцинтилляционной спектрометрии и радиометрии с применением детектора NaI(Tl) размерами 63 х 63 мм и фотоэлектронного умножителя. Основные метрологические характеристики спектрометра МКС-АТ6101ДР даны в табл. 2.2.

Рис. 2.2. Полевой спектрометр МКС-АТ6101ДР (АТОМТЕХ, Минск)

Таблица 2.2. Метрологические характеристики спектрометра МКС-АТ6101ДР

Параметр	Значение
Диапазон энергий регистрируемого гамма-излучения, кэВ	От 50 до 3 000
Диапазон измерений УА, Бк/кг	
^{137}Cs	от 50 до 10^6
^{40}K	от 60 до $2 \cdot 10^4$
^{226}Ra ^{232}Th	от 15 до 10^4
Относительное энергетическое разрешение для гамма-излучения радионуклида ^{137}Cs с энергией 662 кэВ, %	не более 9,5
Эффективность регистрации в пике полного поглощения для энергии гамма-излучения 662 кэВ радионуклида ^{137}Cs точечного источника типа ОСГИ-3,%	5,0 ± 1,0

2.3. Планирование объема исследований характеристик гамма-поля на территории ВУГЗ

Задача определения объема исследований включает выбор расположения и оценку количества стационарных точек полевых спектрометрических измерений *in situ*. Первый этап решения задачи – формирование профилей для проведения пешеходной гамма-съемки. С шагом ~1,0 км нанесена разметка примерно параллельными друг другу профилями планируемых маршрутов пешеходной съемки. Расположение планируемых профилей на территории ВУГЗ и присвоенные их конечным точкам коды представлены на рис. 2.3.

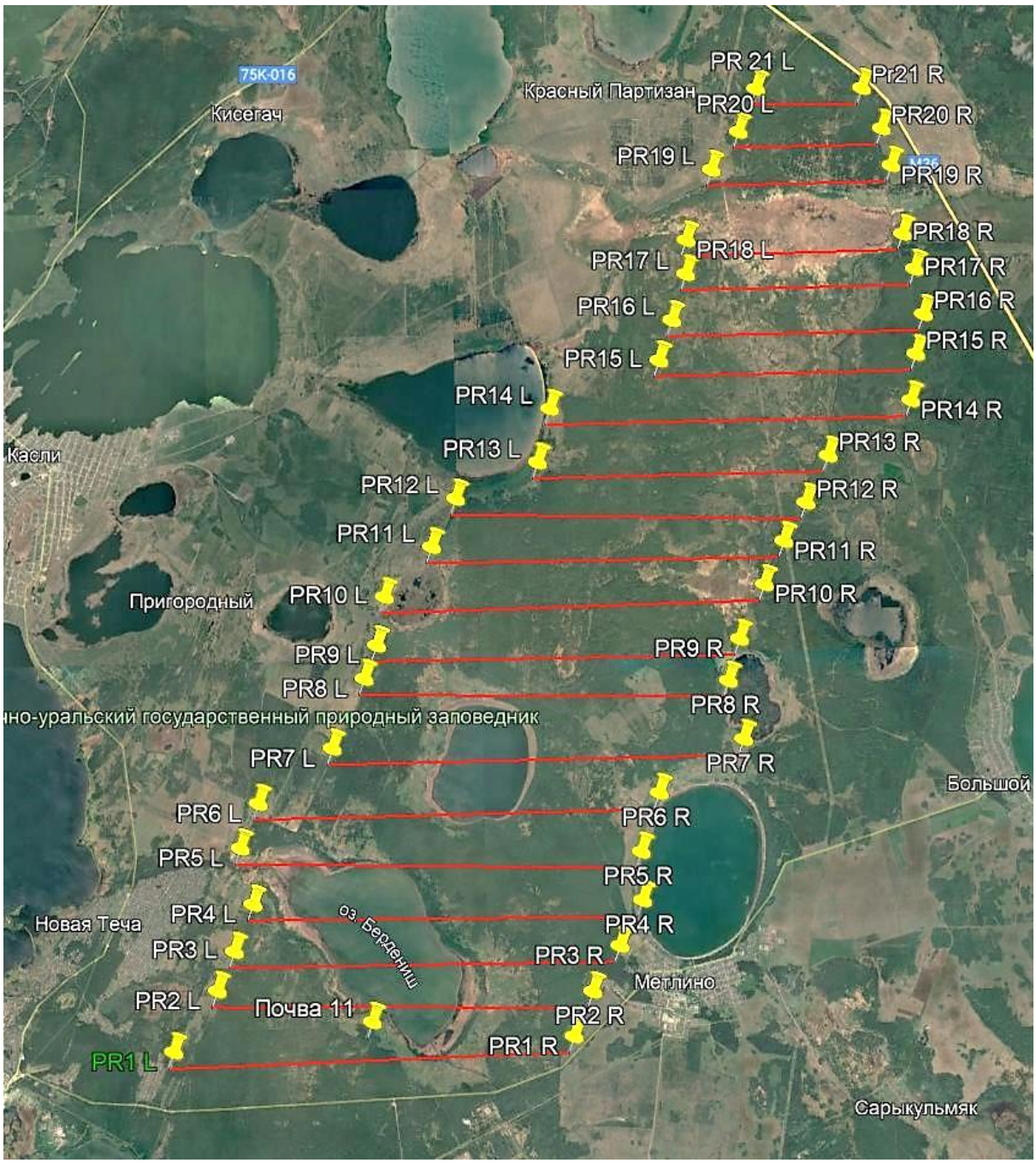


Рис. 2.3. Расположение профилей на территории ВУГЗ для планирования маршрутов пешеходной гамма-съемки

Первый по порядку профиль выбран параллельно южной границе ВУГЗ, примерно в 0,8 км от автодороги Озерск – Метлино. Для кодового обозначения профиля использованы латинские буквы PR и с юга на север присвоен порядковый номер. Например, код PR 15 присвоен профилю, расположенному пятнадцатым по счету, начиная с самого южного профиля PR 1. Начало и окончание каждого профиля совпадают с левой (западной) и правой (восточной) границами ВУГЗ. Каждой крайней точке профиля присвоены свои коды, указывающие на левое или правое окончание соответствующего профиля. Так, самой западной (левой) точке профиля PR 15 присвоен код PR 15L, а самой восточной (правой) точке данного профиля присвоен код PR 15R.

Следующим этапом планирования полевых исследований стала оценка характеристик каждого профиля, влияющих на объем полевых работ:

- координаты (широта, долгота) крайних точек;
- протяженность профиля между крайними точками (км);
- ландшафтные особенности (болота, озера);
- перепады высот по маршруту профиля (м).

Данные с характеристиками каждого планируемого профиля представлены в табл. 2.3. Диапазон протяженности сформированных профилей от 2,36 до 9,07 км. Наибольшие длины присущи южным профилям, самые короткие расположены в северной части заповедника. Средняя протяженность маршрута по планируемым профилям составила 7,93 км. Суммарная протяженность профилей планируемой гамма-съемки составила 145,54 км без учета перемещений между профилями и необходимости возврата в исходную точку. С учетом пересеченной местности и перепадов высот по профилю, а также необходимости возврата в исходную точку для прохождения с оборудованием такого расстояния потребуется до 100 ч, или до 12 рабочих дней.

Таблица 2.3. Запланированные профили для маршрутов пешеходной гамма-съемки

Код профиля	Левая граница*		Правая граница*		Длина, км	Высоты профиля, м	
	долгота	широта	долгота	широта		Мин	Макс
PR 1	60,803847	55,774887	60,944027	55,77637	8,79	225	273
PR 2	60,819307	55,786704	60,950669	55,78504	8,27	224	258
PR 3	60,825460	55,794306	60,960628	55,79385	8,48	224	255
PR 4	60,832271	55,803497	60,968881	55,80264	8,57	224	259
PR 5	60,828107	55,814554	60,968852	55,81218	8,82	224	258
PR 6	60,834733	55,823242	60,975723	55,82364	8,45	229	254
PR 7	60,861048	55,833821	61,005847	55,83387	9,07	232	257
PR 8	60,872718	55,847441	61,001011	55,84547	8,04	234	256
PR 9	60,877343	55,854019	61,005327	55,85369	8,02	235	260
PR 10	60,880422	55,863533	61,014659	55,86439	8,41	229	255
PR 11	60,897415	55,873256	61,021944	55,87286	7,79	229	257
PR 12	60,906247	55,882773	61,030165	55,88035	7,76	230	264
PR 13	60,935530	55,889606	61,038508	55,88965	6,45	227	263
PR 14	60,940284	55,900240	61,068359	55,90025	8,02	228	264
PR 15	60,979416	55,909394	61,070631	55,90948	5,71	223	253
PR 16	60,984416	55,917395	61,073819	55,91743	5,59	218	249
PR 17	60,989739	55,926568	61,071141	55,92655	5,09	214	242
PR 18	60,990242	55,933396	61,067306	55,93366	4,82	212	225
PR 19	60,999987	55,947439	61,064024	55,94746	4,01	215	234
PR 20	61,009864	55,954963	61,060951	55,95493	3,02	225	243
PR 21	61,016543	55,963518	61,054346	55,96321	2,36	231	253

* – Запланированные координаты. Реальные координаты приведены в табл. 3.1

Сформированные профили отличаются ландшафтными условиями и протяженностью по поверхности водоемов и болот. Шесть профилей пересекают озера и еще шесть проходят через заболоченные участки ВУРСа. На участках, проходящих через болота и озера, стационарные точки полевых спектрометрических исследований не планировались. Оценка радиационных характеристик воды, береговой линии и донных отложений озер, болот на территории заповедника не

входила в задачи настоящего исследования и может рассматриваться как самостоятельное направление исследования пресноводных экосистем [23, 24]. Протяженность участков через болота и озера в долях от конкретных запланированных профилей представлена в табл. 2.4.

Таблица 2.4. Протяженность участков озер и болот на запланированных профилях

Код профиля	Водный объект	Протяженность по профилю, км	Доля от протяженности профиля, %
PR 2	оз.Берендиш	2,11	26
PR 3	оз. Берендиш	2,82	33
PR 4	оз. Берендиш	2,72	32
PR 5	оз. Берендиш	2,27	26
PR 6	оз. Урускуль	1,50	18
PR 7	оз. Урускуль	2,02	22
PR 9	болото	0,41	5
PR 10	оз. М.Травянное	1,12	13
	болото	0,92	11
PR 11	болото	0,60	8
PR 13	болото	0,78	12
PR 14	болото	0,15	2
PR 18	бол. Бугай	3,31	69

Протяженность участков через болота и озера менее 1,5 км не приводила к снижению количества стационарных точек измерений. Увеличение протяженности таких участков более 1,5 км приводило к снижению количества планируемых стационарных точек или уменьшению расстояния между отдельными точками на профиле. На каждом сформированном профиле запланированы стационарные точки, включая крайние точки профиля для полевых спектрометрических исследований *in situ*. Пример выполнения спектрометрических измерений в отдельно взятой стационарной точке приведен рис. 2.4.

Рис. 2.4. Выполнение спектрометрических измерений *in situ* на стационарной точке 56 на профиле PR11

Количество точек на каждом запланированном профиле (от 3 до 9, в среднем 6 точек на профиль) зависит от его протяженности, наличия болот и озер.

Количество запланированных стационарных точек на каждом профиле и их коды (обозначения) представлены в табл. 2.5.

Таблица 2.5. Характеристики планируемых профилей для маршрутов пешеходной гамма-съемки

Код профиля	Количество точек на профиле	Коды стационарных точек на профиле	Расстояние между точками, км		
			Среднее	Мин.	Макс.
PR 1	9	PR1L; 1–7; PR1R	1,10	0,67	1,35
PR 2	8	PR2L; 8–13; PR2R	0,87	0,70	1,05
PR 3	6	PR3L; 14–17; PR3R	1,06	0,97	1,20
PR 4	7	PR4L; 18–22; PR4R	0,89	0,50	1,15
PR 5	8	PR5L; 23–28; PR5R	0,83	**0,30**	1,15
PR 6	8	PR6L; 29–34; PR6R	1,26	0,80	2,15
PR 7	8	PR7L; 35–40; PR7R	1,02	0,75	1,25
PR 8	6	PR8L; 41–44; PR8R	1,60	1,10	**2,35**
PR 9	7	PR9L; 45–49; PR9R	1,33	0,60	1,80
PR 10	6	PR10L; 50–53; PR10R	1,39	0,60	1,75
PR 11	7	PR11L; 54–58; PR11R	1,31	0,60	1,95
PR 12	6	PR12L; 59–62; PR12R	1,55	1,25	2,00
PR 13	6	PR13L; 63–66; PR13R	1,28	1,00	1,70
PR 14	7	PR14L; 67–71; PR14R	1,34	0,45	1,85
PR 15	6	PR15L; 72–75; PR15R	1,14	0,80	1,30
PR 16	5	PR16L; 76–78; PR16R	1,40	1,15	1,60
PR 17	5	PR17L; 79–81; PR17R	1,26	1,10	1,35
PR 18	5	PR18L; 82–84; PR18R	1,25	1,20	1,30
PR 19	4	PR19L; 85; 86; PR19R	1,33	1,25	1,40
PR 20	3	PR20L; 87; PR20R	1,48	1,25	1,65
PR 21	3	PR21L; 88; PR21R	1,20	1,15	1,25

Среднее расстояние между соседними точками одного профиля составило 1,22 км, минимальное – 0,30 км (профиль PR5), максимальное 2,35 км (профиль PR8). Схемы расположения стационарных точек, их координаты и расстояния с ближайшими точками соседних профилей представлены на рис. 2.5–2.7. Суммарное количество запланированных точек составило 130. Учитывая среднее расстояние между соседними профилями ~1 км и среднее расстояние между соседними точками на одном профиле 1,22 км, можно сказать, что каждая стационарная точка характеризует участок площадью ~1,22 км^2.

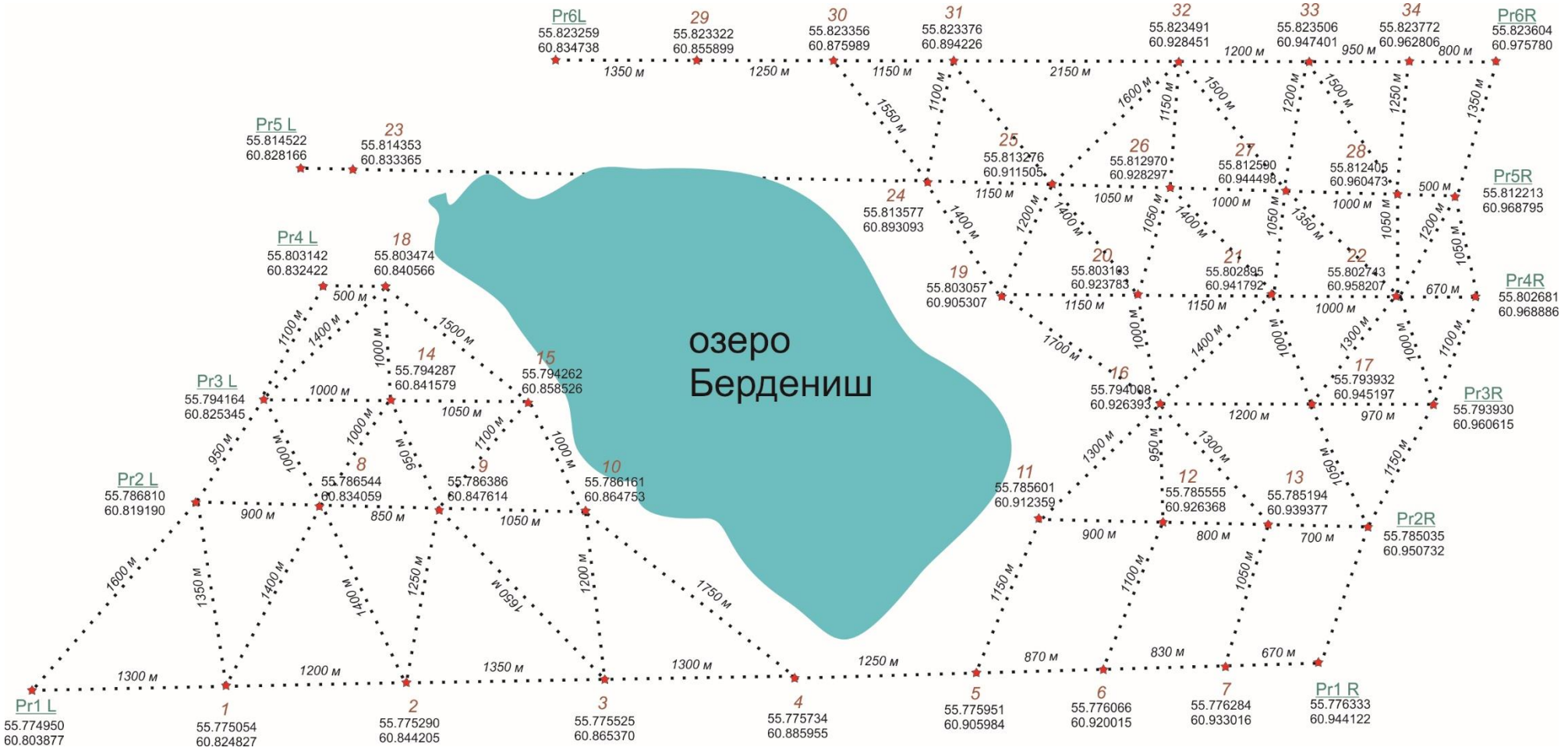


Рис. 2.5. Стационарные точки спектрометрических измерений *in situ* на профилях PR 1–PR 6: ★ – местоположение стационарной точки; ····· – отрезок пути между соседними точками; *2150 м* – расстояние между соседними точками; 55.882326 60.937793 – координата точки

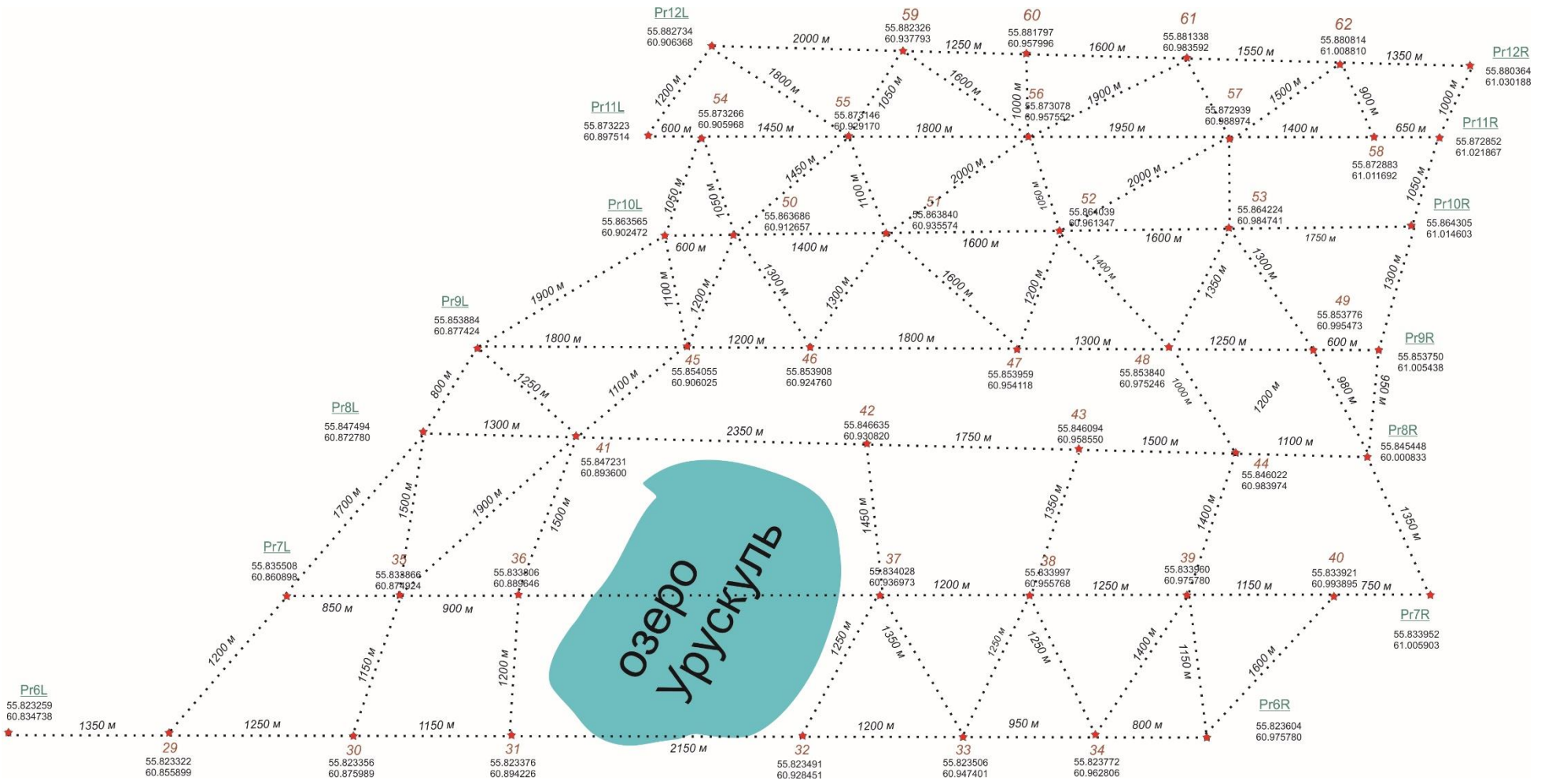


Рис. 2.6. Стационарные точки спектрометрических измерений *in situ* на профилях PR 6–PR 12: ★ – местоположение стационарной точки; ..... – отрезок пути между соседними точками; *2150 м* – расстояние между соседними точками; 55.882326 60.937793 – координата точки

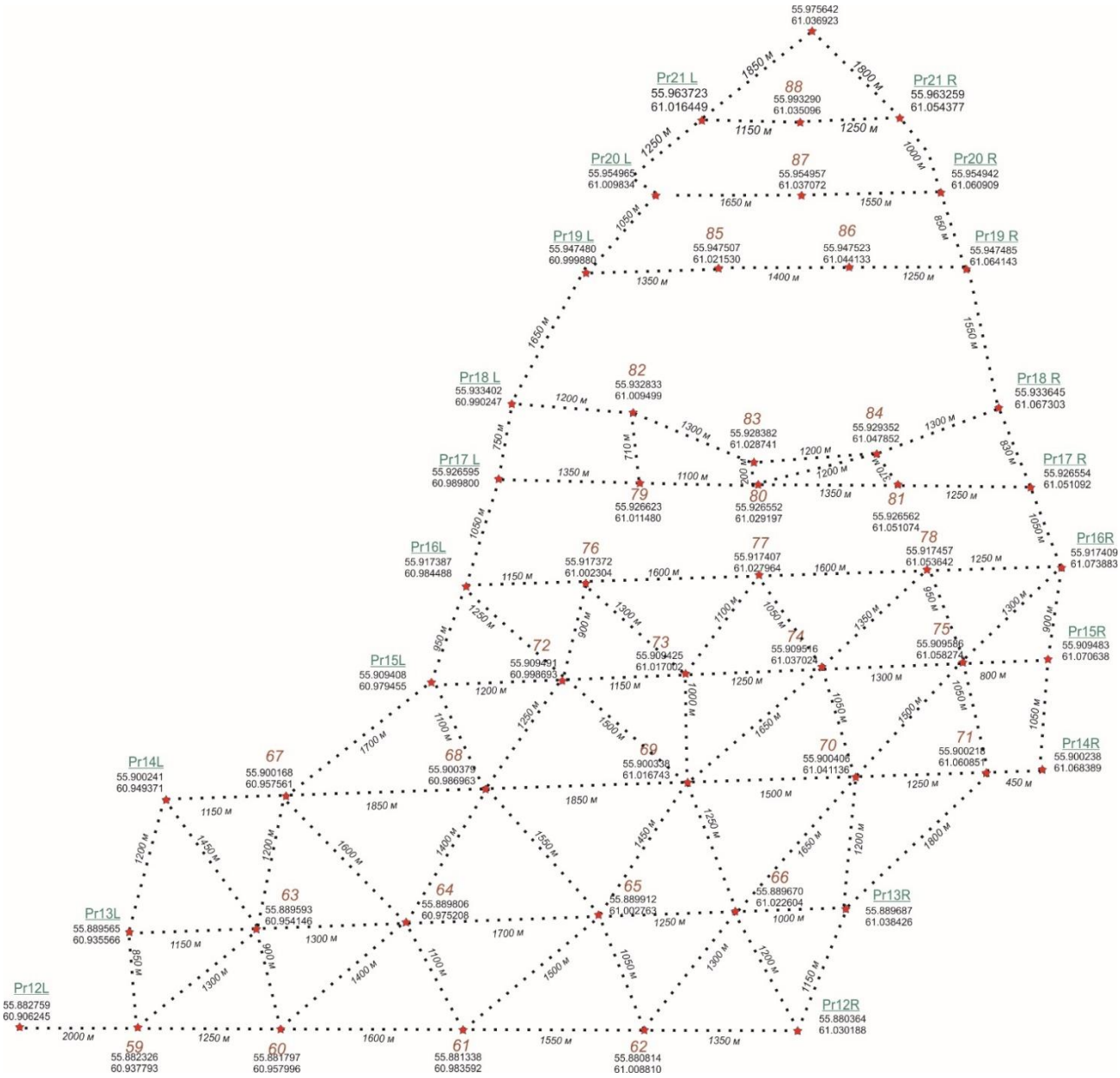


Рис. 2.7. Стационарные точки спектрометрических измерений *in situ* на профилях PR 12–PR 21: ★ – местоположение стационарной точки; ..... – отрезок пути между соседними точками; *2150 м* – расстояние между соседними точками; $^{55.882326}_{60.937793}$ – координата точки

Перемещение по запланированным маршрутам часто происходило в условиях заболоченности отдельных участков, высокой густоты молодого подлеска, плотности соснового валежника (рис. 2.8). Непреодолимые препятствия стали причиной отклонения в расположении части стационарных точек выполнения измерений *in situ* от запланированных координат (рис. 2.5–2.7). Повторные прохождения маршрутов привели к появлению дублирующих стационарных точек, расположенных на различных локальных участках в окрестности запланированной точки. Результат каждого дублирующего измерения рассматривается как отдельный результат в отдельной локальной области.

Рис. 2.8. Валежник между стационарными точками 74 и 75 на профиле PR15

Для обозначения повторных измерений в код точки введена цифра, указывающая на порядок повторного измерения. Пример расположения стационарных точек при повторных измерениях представлен на рис. 2.9.

Рис. 2.9. Реальное расположение серии из трех повторений (красные метки) в районе запланированной стационарной точки 77 (желтая метка) на профиле PR16

2.4. Отбор проб почвы для лабораторных исследований

В рамках исследования выполнен отбор проб почвы в 30 произвольных точках для последующего лабораторного определения содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs. Каждой точке отбора пробы присваивался код Почва № и указывалась глубина отобранного слоя (табл. 2.6).

Таблица 2.6. Опись проб почвы

№ точки п/п	Дата отбора	№ образца	Код пробы/глубина, см	Масса без подготовки, г	Координаты	
					Долгота	Широта
1	07.07.2023	1	Почва 1 / 0–5	1327	60,892084	55,773244
	07.07.2023	2	Почва 1 / 5–10	1632		
	07.07.2023	3	Почва 1 / 10–15	1686		
	07.07.2023	4	Почва 1 / 15–20	1744		
2	01.08.2023	5	Почва 2 / 0–5	1089	60,938145	55,773703
	01.08.2023	6	Почва 2 / 5–10	1659		
	01.08.2023	7	Почва 2 / 10–15	1511		
3	01.08.2023	8	Почва 3 / 0–5	1341	60,917082	55,769947
	01.08.2023	9	Почва 3 / 5–10	1950		
	01.08.2023	10	Почва 3 / 10–15	2084		
4	01.08.2023	11	Почва 4 / 0–5	1523	60,884765	55,780372
	01.08.2023	12	Почва 4 / 5–10	1339		
	01.08.2023	13	Почва 4 / 10–15	1695		
5	01.08.2023	14	Почва 5 / 0–5	1434	60,885261	55,780469
	01.08.2023	15	Почва 5 / 5–10	2120		
	01.08.2023	16	Почва 5 / 10–15	2130		
6	01.08.2023	17	Почва 6 / 0–5	1781	60,882749	55,779434
	01.08.2023	18	Почва 6 / 5–10	1918		
	01.08.2023	19	Почва 6 / 10–15	1927		
7	01.08.2023	20	Почва 7 / 0–5	1367	60,882446	55,778628
	01.08.2023	21	Почва 7 / 5–10	1565		
	01.08.2023	22	Почва 7 / 10–15	1652		
8	01.08.2023	23	Почва 8 / 0–5	1910	60,884369	55,777533
	01.08.2023	24	Почва 8 / 5–10	1737		
	01.08.2023	25	Почва 8 / 10–15	2240		
9	01.08.2023	26	Почва 9 / 0–5	1306	60,869107	55,781823
	01.08.2023	27	Почва 9 / 5–10	1915		
	01.08.2023	28	Почва 9 / 10–15	1927		
10	01.08.2023	29	Почва 10 / 0–5	1632	60,871604	55,780650
	01.08.2023	30	Почва 10 / 5–10	1931		
	01.08.2023	31	Почва 10 / 10–15	2074		
11	01.08.2023	32	Почва 11 / 0–5	1606	60,873925	55,780272
	01.08.2023	33	Почва 11 / 5–10	1822		
	01.08.2023	34	Почва 11 / 10–15	1887		
12	03.08.2023	35	Почва 12 / 0–5	1218	60,926368	55,785555
	03.08.2023	36	Почва 12 / 5–10	1645		
	03.08.2023	37	Почва 12 / 10–15	1485		
13	09.08.2023	38	Почва 13 / 0–15	2881	60,825670	55,794312
14	09.08.2023	39	Почва 14 / 0–15	2732	60,810812	55,767909
15	09.08.2023	40	Почва 15 / 0–15	1851	60,826957	55,767364
16	09.08.2023	41	Почва 16 / 0–15	1346	60,843790	55,767616
17	09.08.2023	42	Почва 17 / 0–15	2191	60,843790	55,767616
18	09.08.2023	43	Почва 18 / 0–15	2202	60,843886	55,768477
19	09.08.2023	44	Почва 19 / 0–15	1962	60,859397	55,767804
20	09.08.2023	45	Почва 20 / 0–15	1641	60,859104	55,768741
21	09.08.2023	46	Почва 21 / 0–15	1956	60,873107	55,768344
22	09.08.2023	47	Почва 22 / 0–15	1830	60,873845	55,768566
23	09.08.2023	48	Почва 23 / 0–15	2110	60,871384	55,768821
24	09.08.2023	49	Почва 24 / 0–15	1732	60,871397	55,768181
25	09.08.2023	50	Почва 25 / 0–15	1872	60,889943	55,768617
26	09.08.2023	51	Почва 26 / 0–15	2373	60,891389	55,767159
27	11.08.2023	52	Почва 27 / 0–15	1829	60,944498	55,812590
28	14.08.2023	53	Почва 28 / 0–15	1373	61,015161	55,919369
29	14.08.2023	54	Почва 29 / 0–15	1790	60,985319	55,918227
30	14.08.2023	55	Почва 30 / 0–15	1595	60,966547	55,902018

Всего в 30 произвольных точках отобрано 55 образцов почвы средней массой 1 783 г, в диапазоне от 1 089 до 2 881 г. Пробы почвы в точках Почва 1 – Почва 12 отбирались слоями по 5 см с квадратной площадки 15 × 15 см. Плотность отобранных послойно образцов почвы до подготовки счетного образца составила:

- слой 0–5 см, среднее значение 1,30 г/см^3, диапазон от 0,97 до 1,70 г/см^3;
- слой 5–10 см, среднее значение 1,57 г/см^3, диапазон от 1,19 до 1,88 г/см^3;
- слой 10–15 см, среднее значение 1,65 г/см^3, диапазон от 1,32 до 1,99 г/см^3.

Интегральные пробы почвы в точках Почва 13 – Почва 30 одним слоем 15 см отбирались с локальной квадратной площадки 10 × 10 см. Средняя плотность интегральных проб составила 1,31 г/см^3, диапазон от 0,90 до 1,92 г/см^3. Перед отбором проб почвы в каждой точке отбора выполнялись измерения *in situ* УА ^{137}Cs, поскольку данные о плотности почвы необходимы для оценки ослабления излучения при моделировании отклика СИ с учетом характера распределения активности по глубине.

2.5. Измеряемые параметры

Для проведения измерений в полевых условиях на каждом маршруте вблизи запланированных координат выбирались стационарные точки. Для размещения полевого спектрометра и выполнения измерений *in situ* предпочтение отдавалось участкам поверхности с визуально ненарушенной структурой почвенного покрова. Измеряемые параметры в каждой стационарной точке (в том числе точки начала и окончания профилей) и точках отбора проб почвы включали:

- МАЭД на поверхности почвы, нЗв/ч;
- МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы, нЗв/ч;
- УА гамма-излучающих радионуклидов *in situ*, Бк/кг.

По маршруту следования оператора выполнялось измерение МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы, нЗв/ч. Всего было выполнено 47 011 измерений.

2.6. Записи результатов полевых исследований

Применение современных средств измерения с интеллектуальными блоками, осуществляющими в автоматическом режиме сохранение результатов измерения, даты, времени, координат и других сопутствующих данных (скорости счета, числа зарегистрированных импульсов, температуры и т. д.), не исключает необходимости ведения полевого журнала для фиксирования в нем основных результатов. Такие записи позволяют восстановить утерянные или некорректно записанные данные в памяти СИ. На рис. 2.10 представлен вариант сбоя программы записи координат точек маршрута гамма-съемки – все результаты измерения за один рабочий день автоматически сохранены с одной и той же координатой. При отсутствии записей в полевом журнале невозможно было бы восстановить данные полевых исследований при такой программной ошибке.

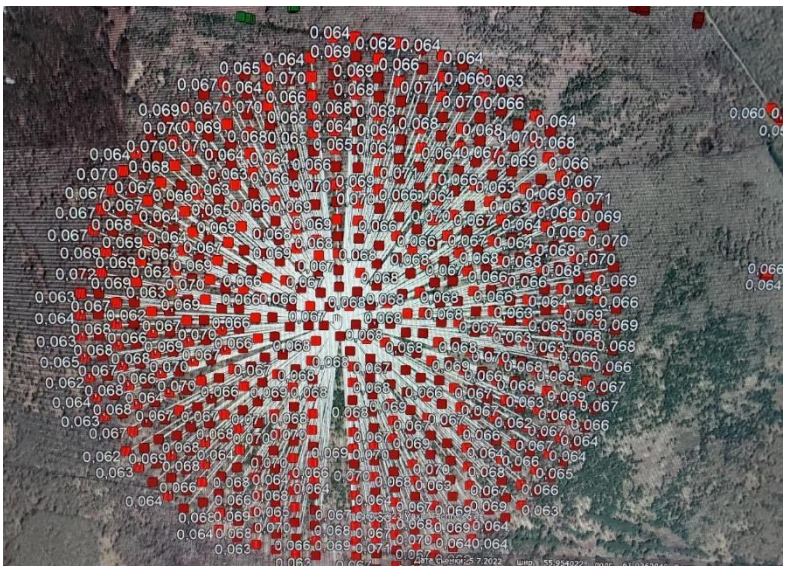


Рис. 2.10. Пример сбоя программы автоматической записи координат маршрута гамма-съемки

Формат записей в полевом журнале выбирается из поставленных задач исследования. В представленных исследованиях записи по каждой стационарной точке (в том числе точках начала и окончания профилей) и точках отбора проб почвы условно разбиты на две категории:

– данные о местоположении стационарной точки и последовательности ее обследования: код точки, координаты (долгота, широта), дата, время начала обследования;

– данные о гамма-поле в конкретной стационарной точке: тип использованного СИ, МАЭД по показаниям конкретного типа СИ (мкЗв/ч), УА идентифицированных радионуклидов (Бк/кг).

В полевом журнале на точках отбора проб записи дополнительно включали опись отобранных образцов: последовательный номер точки отбора пробы и код образца с указанием отобранного по глубине слоя почвы. Для последующей валидации записей проводилась фотофиксация показания СИ на момент выполнения измерения (рис. 2.11).

Рис. 2.11. Примеры фотофиксации показания СИ для валидации записей полевого журнала в стационарных точках 59 и ПОЧВА 19

2.7. Перспективы применения результатов полевых и лабораторных исследований

Массив результатов полевых и лабораторных исследований состоит из следующих выборок (в порядке возрастания количества данных):

- *лабораторные определения УА ^{137}Cs* $\{^{LAB}SA_{Cs,i}\}$, где i = 1…30;
- *лабораторные определения УА ^{90}Sr* $\{^{LAB}SA_{Sr,i}\}$, где i = 1…30;
- *in situ определения УА ^{137}Cs* $\{^{is}SA_{Cs,j}\}$, где j = 1…170;
- *in situ определения УА ЕРН* $\{^{is}SA_{NR,j}\}$, где j = 1…170;
- *МАЭД на поверхности почвы* $\{DR^{h=0}_{j}\}$, где j = 1…170;
- *МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы в точках* $\{^{pnt}DR^{h=1}_{j}\}$, где j = 1…170;
- *МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы на маршрутах* $\{^{tr}DR^{h=1}_{k}\}$, где k = 1…47 011.

Главная задача исследования в конечном итоге – оценка актуального запаса идентифицированных радионуклидов в почвах заповедника. Для этого необходимо построить эмпирические модели, связывающие значения удельной активности (искомая величина) с мощностью дозы, т. е. с показателями, которые относительно легко и быстро регистрируются в полевых условиях (предикторы). Модели могут корректироваться при поступлении новых данных.

Например, на основе полученных результатов полевых работ может быть построена модель, позволяющая по значениям МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы $\{^{tr}DR^{h=1}_{k}\}$ сформировать выборку $\{^{is}SA_{Cs,k}\}$ значений УА ^{137}Cs в почве в более чем 47 тысячах точках на территории заповедника. Консервативно предполагается, что статистические характеристики выборок $\{^{tr}DR^{h=1}_{k}\}$ и $\{^{pnt}DR^{h=1}_{j}\}$ тождественны друг другу; статистические характеристики восстановленных данных $\{^{is}SA_{Cs,k}\}$ также будут тождественны данным измерений $\{^{is}SA_{Cs,j}\}$. Тогда параметры эмпирической зависимости значений $\{^{is}SA_{Cs,j}\}$ непосредственно от $\{^{pnt}DR^{h=1}_{j}\}$, полученных по результатам прямых измерений в j точках применимы для восстановления искомых значений $\{^{is}SA_{Cs,k}\}$:

$$\{^{is}SA_{Cs,k}\} = f\,(a,\, b,\, \{^{tr}DR^{h=1}_{k}\}), \qquad (2.1)$$

где a и b – оценки параметров корреляционной связи между $\{^{is}SA_{Cs,j}\}$ и $\{^{pnt}DR^{h=1}_{j}\}$. В случае нормального распределения исследуемых величин в качестве модели корреляционной связи можно использовать простую линейную регрессию с параметрами a (коэффициент наклона) и b (свободный член).

Другой способ определения УА ^{137}Cs в почве заключается в использовании значений МАЭД на поверхности почвы. В этом случае эмпирическая модель имеет следующий общий вид:

$$\{^{is}SA_{Cs,j}\} = f\,(a,\, b,\, \{DR^{h=0}_{j}\}), \qquad (2.2)$$

где a и b – (при нормальном распределении исследуемых величин) оценки параметров линейной регрессии $\{^{is}SA_{Cs,j}\}$ от $\{DR^{h=0}_{j}\}$. Такой подход может способствовать оптимизации полевых исследований, существенно сократив время выполнения измерений *in situ* (для регистрации МАЭД требуются секунды, УА – минуты). При этом прогностическое качество модели (2.2) ожидается более высоким по сравнению с (2.1), поскольку в ней исключено влияние погрешностей, связанных с измерениями на расстоянии от поверхности почвы.

При построении эмпирических моделей для расчета значений УА ^{137}Cs в почве на основе измеренных значений мощности дозы важно также понимать степень коррелированности самих значений МАЭД на поверхности и на высоте 1 м над поверхностью. Эту информацию следует учитывать при построении более сложных множественных зависимостей, а также можно использовать для восстановления

одних пропущенных данных по другим. Зависимость между величинами МАЭД оценивается по результатам прямых измерений в *j* точках:

$$\{DR^{h=0}_{j}\} = f\,(a,\ b,\ \{^{pnt}DR^{h=1}_{j}\}). \qquad (2.3)$$

Следует отметить, что представленные результаты прямых измерений применимы для оценки запаса идентифицированных радионуклидов в почвах и грунтах на территории ВУГЗ только при учете факторов, влияющих на цифровое значение отклика блоков детектирования используемых СИ, таких как собственный фон СИ, космическое излучение, вклад ЕРН в значение мощности дозы. В последующих статьях цикла будут оценены основные факторы, показаны модели, связывающие результаты измерений с условиями их выполнения, учет которых позволит обосновать методический подход к использованию совокупности всех данных полевых исследований для оценки актуального значения активности радионуклидов в грунтах и почвах, формирующих радиоактивное загрязнение обследованной территории.

2.8. Оценка радиоактивного загрязнения приземного слоя атмосферы

Дополнительно к основной программе в период проведения полевых исследований выполнялся контроль содержания радиоактивных веществ в приземном слое атмосферы на территории заповедника. Задача такого контроля – оценка возможного влияния загрязнения атмосферы на актуальное радиационное состояние территории ВУГЗ. Контроль проводился методом отбора проб воздуха в 10 точках вдоль западной и восточной границ заповедника (рис. 2.12).

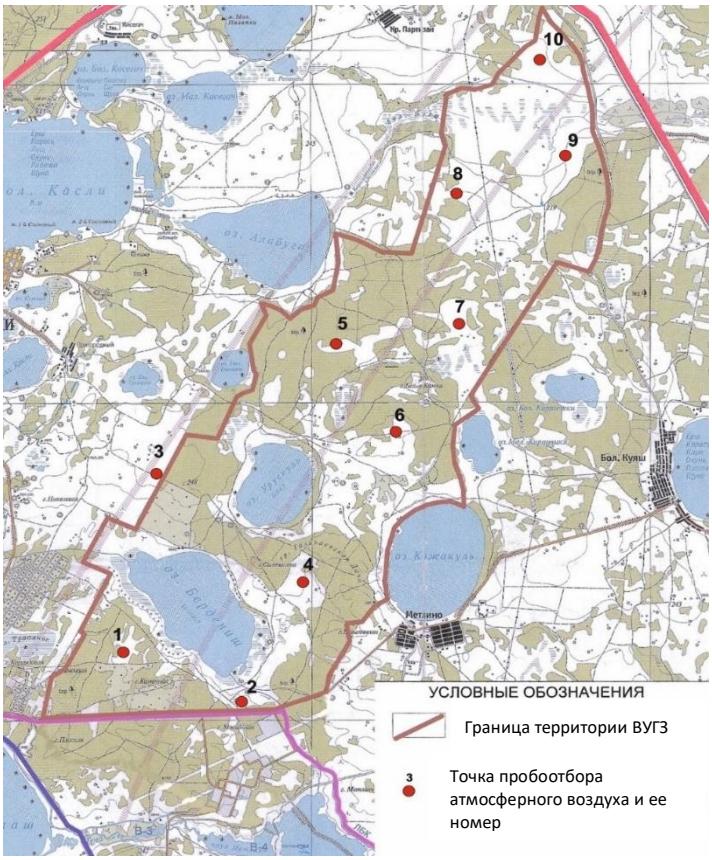


Рис. 2.12. Точки расположение оборудования для отбора проб воздуха приземного слоя атмосферы

Отбор проб приземного слоя атмосферы выполнялся для оценки объемной активности:

– гамма-излучающих радионуклидов, изотопов ^{90}Sr, ^{239}Pu+^{240}Pu, ^{238}Pu+^{241}Am – в форме аэрозолей:

– изотопов ^{3}H, ^{14}C в газообразной форме.

Для отбора проб радиоактивных аэрозолей использовалась мобильная воздухофильтрующая установка (далее – ВФУ) большой производительности (рис. 2.13 а). Улавливание радиоактивных аэрозолей при помощи ВФУ производилось на фильтрующие нано- и микроволокнистые материалы [25]. Использованные фильтрующие материалы обладают низкой температурой разложения полимера, высокой эффективностью отбора частиц в широком диапазоне размеров, а также низким сопротивлением потоку воздуха. Расход воздуха через фильтрующий материал при отборе проб с помощью ВФУ составлял 500–600 $м^3$/ч, что позволило определять объемную активность в диапазоне от 10^{-5} до 10^{-3} $Бк/м^3$ [26].

Для оценки содержания ^{3}H и ^{14}C в атмосферном воздухе производился отбор проб методом барботирования с помощью мобильного пробоотборного стенда (рис. 2.13 б). Концентрирование ^{3}H, ^{14}C в водных средах барботера происходит за счет непрерывной прокачки атмосферного воздуха через установку и длительного времени отбора пробы [27, 28].

а) б)

Рис. 2.13. Оборудование для отбора проб воздуха приземного слоя атмосферы:
а) ВФУ; б) стенд для отбора ^{3}H и ^{14}C

3. Результаты

Данные получены в ходе полевых исследований путем фиксации результатов измерений МАЭД гамма-излучения и УА гамма-излучающих радионуклидов *in situ* поверенными СИ в 140 стационарных точках, а также дополнительно в 30 отдельных точках отбора проб почвы. Из общей совокупности 170 точек, где проводились исследования, 55 стационарных точек находятся на периметре заповедника (см. рис. 3.1). Средняя плотность распределения стационарных точек по территории, которая характеризует так называемую единицу масштаба исследования по

аналогии с принятой в работе [3] терминологии, равна 1 точке на ~1,22 км^2. В каждой стационарной точке и точке отбора проб почвы выполнялись измерения:

- МАЭД на поверхности почвы;
- МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы;
- УА гамма-излучающих радионуклидов *in situ*.

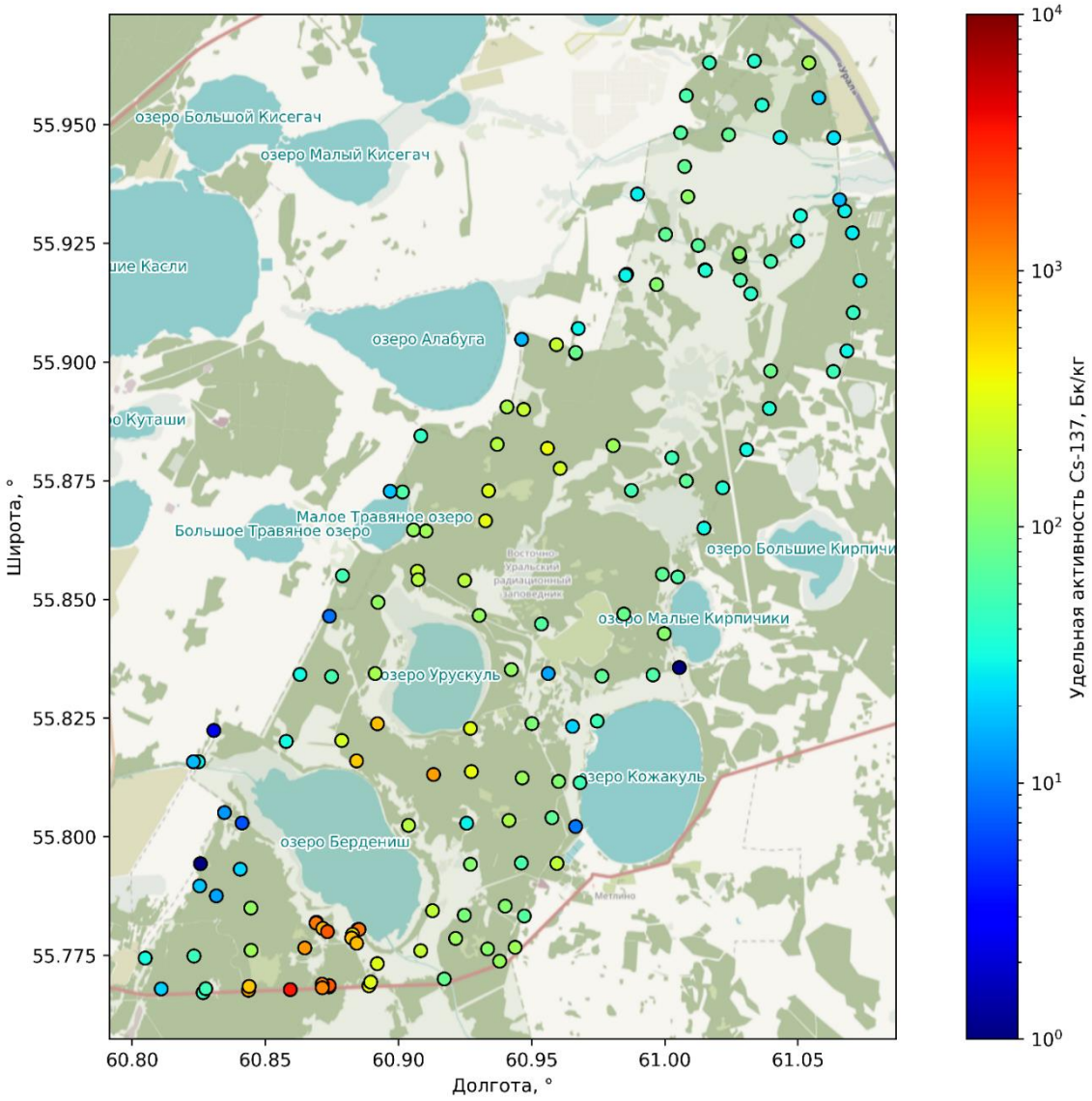


Рис. 3.1. Визуализация точек и результатов измерения УА ^{137}Cs *in situ*

Из рис. 3.1 можно сделать вывод, что точки в южной части ВУГЗ характеризуются большим значением УА Cs-137, чем в северной.

Все полученные значения МАЭД выборок – *МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы* и *МАЭД на поверхности почвы* – находятся в установленном для СИ диапазоне измерений мощности дозы гамма-излучения. Пределы неопределенности значений МАЭД соответствуют метрологическим характеристикам СИ (табл. 2.1 и 2.2). Запись результата измерения МАЭД фиксировалась при значениях коэффициента вариации меньше 5 % (рис. 2.11). Коэффициент вариации как отношение стандартного отклонения к среднему данной выборки рассчитывается и выводится на экран дисплея СИ автоматически. Выборка

формируется СИ автоматически в момент начала измерения на каждой локальной точке в отдельности.

Вне стационарных точек по маршруту следования оператора выполнялось измерение МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы. Количество таких измерений превышает 47 тыс. записей, которые вошли в выборку – *МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы на маршрутах*. Визуализация выполненных маршрутов и неоднородность значений МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы в заповеднике представлена на рис. 3.2. Подробный анализ полученных данных на маршрутах следования и использование данных выборки – *МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы на маршрутах* – для оценки запаса радионуклидов в почвах заповедника будут представлены в одной из статей данного цикла публикаций.

Часть результатов измерений *in situ* УА гамма-излучающих радионуклидов находится ниже установленных для полевого спектрометра (МКС-АТ6101ДР) значений диапазона измерений, а именно:

^{137}Cs – в 64 точках исследования, или 38,1 % значений;

^{40}K – в 30 точках исследования, или 18,0 % значений;

^{226}Ra – в 160 точках исследования, или 95,2 % значений;

^{232}Th – в 133 точках исследования, или 80,1 % значений.

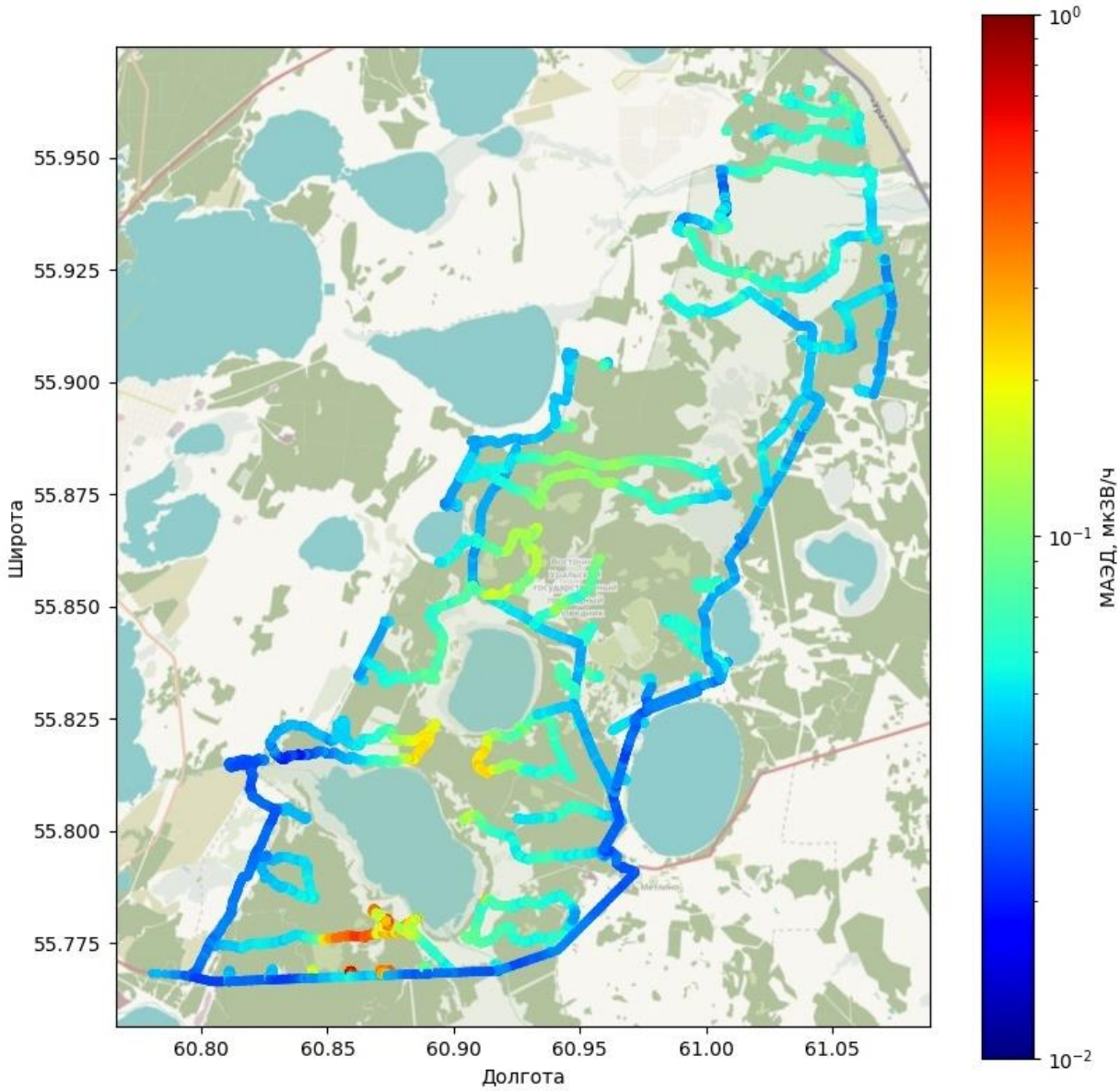


Рис. 3.2. Маршруты пешеходной гамма-съемки и значения МАЭД (мкЗв/ч) на маршрутах

Наибольшие значения МАЭД наблюдаются в южной части ВУГЗ, а также вблизи водоемов, расположенных внутри заповедника.

Расположение точек отбора проб почвы для лабораторных исследований представлено на рис. 3.3.

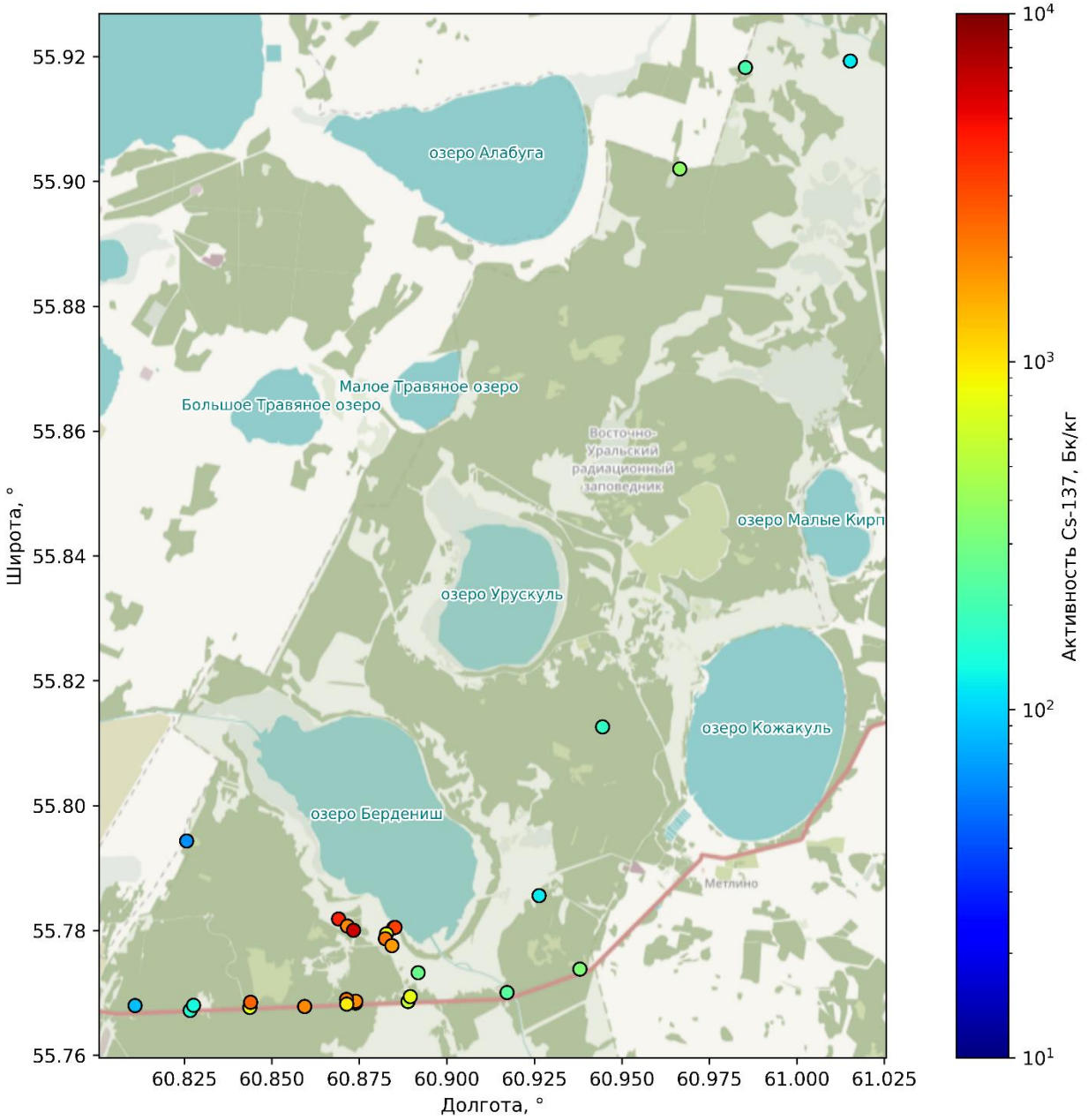


Рис. 3.3. Визуализация расположения точек отбора проб почвы и результатов лабораторного определения УА ^{137}Cs в почве

Данные выборок – *лабораторные определения УА* ^{137}*Cs* и *лабораторные определения УА* ^{90}*Sr* – и их применение для оценки запаса в грунтах и почвах заповедника будут представлены в отдельной статье.

Результаты полевых измерений обобщены в табл. 3.1. Незаполненные ячейки в таблице означают отсутствие валидации конкретной записи. В таблицу внесены все результаты, включая значения ниже установленного диапазона измерений, что позволяет визуально оценить неоднородность как радиоактивного загрязнения, так и содержания естественных радионуклидов в почвах ВУГЗ.

Таблица 3.1. Данные полевых исследований

п/п	Дата измерения	Код точки	Долгота / широта	МАЭД, нЗв/ч		Удельная активность, Бк/кг				Δ удельной активности, %			
				на пов-ти почвы	на 1 м над пов-тью	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232
1	24 ноября 2022	PR3L_2	60,824438 55,792389	61	н/д	3,1	142,0	16,4	6,7	±2,50	±48	±7,2	±4,47
2		PR4L_2	60,825761 55,811079	48	н/д	4,8	54,8	11,0	<4	±2,28	±33,3	±5,8	±3,87
3		PR6L_2	60,832051 55,824357	55	н/д	6,2	54,3	13,4	9,5	±2,62	±35,7	±7,0	±5,05
4		PR8L_2	60,871919 55,843864	71	н/д	27,6	132,0	14,6	4,6	±6,3	±49	±6,7	±4,25
5		PR1L_2	60,803225 55,767105	67	н/д	19,7	103,0	14,8	4,4	±4,9	±42	±6,7	±4,22
6		2_2	60,848224 55,767718	218	н/д	315,0	41,6	14,2	4,7	±63	±34,8	±6,6	±4,25
7		PR1R_2	60,939768 55,773545	76	н/д	66,7	45,4	8,7	6,6	±13,3	±33,1	±5,8	±4,31
8	26 июня 2023	PR21R	61,054037 55,962953	134	65	155,0	288,0	<8,43	15,7	±31	±66	±4,74	±4,9
9		88	61,033638 55,963301	90	62	39,9	0,0	<8,17	18,4	±8,3	±75	±4,91	±5,4
10		PR21L	61,016578 55,962769	102	68	47,5	374,0	15,8	20,6	±9,7	±84	±6,4	±5,8
11		PR20L	61,007859 55,955931	97	65	59,2	349,0	12,9	12,6	±12,3	±84	±6,8	±5,6
12		87	61,036558 55,954083	110	57	37,3	357,0	18,1	22,4	±8,5	±87	±8,7	±7,4

Продолжение табл. 3.1

п/п	Дата измерения	Код точки	Долгота / широта	МАЭД, нЗв/ч		Удельная активность, Бк/кг				Δ удельной активности, %			
				на пов-ти почвы	на 1 м над пов-тью	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232
13		PR20R	61,057844 55,955452	102	65	21,1	404,0	10,6	24,9	±5,5	±95	±7,8	±7,8
14	29 июня 2023	PR19R	61,063499 55,947204	77	54	24,6	193,0	<9,74	13,2	±5,8	±55	±6,30	±5,7
15		86	61,043241 55,947275	95	62	27,9	310,0	11,1	14,9	±6,6	±77	±6,9	±6,0
16		85	61,023948 55,947784	101	69	75,8	208,0	<11,1	9,7	±15,2	±57	±6,0	±5,05
17		PR19L	61,005955 55,947125	59	39	67,4	<25,6	0,0	<3,52	±13,5	±25,6	–	±3,52
18		PR18L_2	61,007489 55,941165	73	59	75,2	62,3	<4,78	<6,02	±15,0	±32,9	±4,67	±3,90
19		82	61,008666 55,934861	91	59	125,0	0,0	<3,97	0,0	±25	–	±3,97	–
20		PR18L	60,989607 55,935296	44	27	28,3	<21,5	0,0	<2,26	±6,1	±21,5	–	±2,26
21		PR17L	61,000372 55,926751	103	70	76,6	273,0	6,5	6,6	±15,3	±69	±5,76	±4,43
22		79	61,012581 55,924450	113	89	67,7	317,0	17,9	10,4	±13,9	±78	±7,7	±5,2
23		80	61,028081 55,922309	89	66	120,0	<58,9	5,4	<5,93	±24	±31,1	±5,08	±3,91
24		83	61,028349 55,922895	89	68	115,0	50,8	<5,77	6,3	±23	±31,6	±5,27	±4,37
25		81_2	61,039685 55,921155	90	72	56,5	218,0	9,5	16,1	±11,7	±60	±6,96	±6,2

Продолжение табл. 3.1

п/п	Дата измерения	Код точки	Долгота / широта	МАЭД, нЗв/ч		Удельная активность, Бк/кг				Δ удельной активности, %			
				на пов-ти почвы	на 1 м над пов-тью	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232
26		81	61,049792 55,925385	82	65	31,6	283,0	<11,5	16,4	±7,2	±71	±6,7	±6,3
27		84	61,051026 55,930819	90	66	33,1	299,0	9,8	20,5	±7,6	±75	±7,40	±7,0
28		PR17R_2	61,067785 55,931596	72	58	28,7	225,0	<9,60	9,9	±6,6	±60	±5,95	±5,10
29		PR18R	61,065720 55,934210	73	55	17,6	295,0	<7,49	12,5	±4,6	±73	±6,10	±5,6
30	07 июля 2023	PR1L	60,804864 55,774440	56	38	32,3	113,0	0,0	<5,00	±7,0	±39	–	±3,79
31		PR4L	60,834598 55,805111	62	42	12,7	213,0	0,0	14,0	±3,6	±58	–	±5,8
32		18	60,841251 55,802907	56	41	6,7	181,0	0,0	4,7	±2,71	±51	–	±4,19
33		23_1	60,825070 55,815640	52	36	29,4	67,4	0,0	<3,00	±6,4	±33,0	–	±3,00
34		PR5L	60,822832 55,815785	42	31	17,5	<43,0	0,0	<3,10	±4,1	±28,4	–	±3,10
35		PR3L	60,825700 55,793877	59	43	1,0	239,0	0,0	6,1	–	±61	–	±4,35
36		14	60,840534 55,793083	75	51	21,3	252,0	<7,72	14,6	±5,2	±65	±6,33	±5,9
37		9	60,844573 55,784914	82	52	131,0	<59,1	<6,18	6,0	±26	±30,8	±5,27	±4,35
38		8	60,831631 55,787554	65	45	14,0	223,0	<7,58	7,4	±3,9	±59	±5,54	±4,50

Продолжение табл. 3.1

п/п	Дата измерения	Код точки	Долгота / широта	МАЭД, нЗв/ч		Удельная активность, Бк/кг				Δ удельной активности, %			
				на пов-ти почвы	на 1 м над пов-тью	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232
39		PR2L	60,825593 55,789373	64	43	19,7	185,0	9,3	6,4	±4,8	±53	±5,92	±4,41
40		1	60,823165 55,774785	82	53	49,7	240,0	<9,55	15,7	±10,5	±63	±6,55	±6,1
41		2	60,844664 55,776037	98	63	150,0	46,9	<8,30	<4,40	±30	±30,9	±4,75	±3,74
42		3	60,864852 55,776584	597	364	968,0	57,5	0,0	<3,49	±194	±31,7	–	±3,49
43		10	60,884776 55,780474	199	239	230,0	138,0	0,0	<5,24	±46	±44	–	±3,82
44		15	60,869278 55,782015	737	376	1550,0	88,1	10,4	<6,37	±0,31	±40,0	±5,5	±3,98
45		4 (ПОЧВА 1)	60,892084 55,773244	171	123	303,0	161,0	0,0	<5,77	±61	±47	–	±3,87
46	14 июля 2023	PR1R	60,943770 55,776608	99	63	145,0	101,0	<11,6	8,5	±29	±40	±5,9	±4,62
47		7	60,933421 55,776396	90	56	118,0	115,0	<10,4	9,5	±24	±42	±5,9	±5,01
48		6	60,921312 55,778513	103	67	147,0	159,0	<10,4	9,0	±29	±49	±5,9	±4,66
49		5	60,908313 55,775995	136	85	235,0	244,0	<7,91	4,9	±47	±63	±5,26	±4,22
50		11	60,912861 55,784494	157	72	208,0	130,0	0,0	<3,34	±42	±42	–	±3,34
51		12	60,924535 55,783571	90	58	98,3	199,0	<5,71	7,9	±19,7	±55	±5,47	±4,54

Продолжение табл. 3.1

п/п	Дата измерения	Код точки	Долгота / широта	МАЭД, нЗв/ч		Удельная активность, Бк/кг				Δ удельной активности, %			
				на пов-ти почвы	на 1 м над пов-тью	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232
52		13	60,940132 55,785378	90	52	114,0	97,7	<11,2	10,8	±23	±40,3	±6,1	±5,3
53		PR2R	60,947105 55,783278	92	62	66,0	262,0	<8,88	15,5	±13,4	±67	±6,49	±6,1
54		PR3R	60,959150 55,794157	70	46	21,1	261,0	0,0	13,7	±5,2	±66	–	±5,8
55		PR4R	60,966621 55,802093	62	43	9,5	231,0	0,0	9,6	±3,19	±60	–	±5,02
56		22	60,957544 55,804086	75	50	72,6	138,0	<6,93	5,3	±14,5	±44	±5,24	±4,27
57		21	60,941454 55,803415	106	69	174,0	131,0	<6,38	4,4	±35	±43	±5,09	±4,17
58		20	60,925651 55,802847	73	50	28,4	233,0	<6,58	11,8	±6,5	±61	±5,97	±5,4
59		19	60,903738 55,802387	161	109	196,0	199,0	<7,83	13,5	±39	±55	±6,21	±5,7
60		16	60,927248 55,794318	90	58	113,0	113,0	<5,86	<7,82	±23	±40	±4,97	±4,09
61		17	60,946238 55,794459	70	42	56,3	153,0	0,0	4,2	±11,4	±46	–	±4,14
62	20 июля 2023	29	60,857900 55,820042	66	47	31,6	168,0	<9,14	7,6	±7,0	±50	±5,66	±4,52
63		30	60,878820 55,820214	167	134	267,0	269,0	<8,43	9,3	±53	±68	±5,80	±4,68
64		31	60,892048 55,823754	343	180	664,0	59,0	<11,5	7,1	±133	±34,1	±5,8	±4,48

Продолжение табл. 3.1

п/п	Дата измерения	Код точки	Долгота / широта	МАЭД, нЗв/ч		Удельная активность, Бк/кг				Δ удельной активности, %			
				на пов-ти почвы	на 1 м над пов-тью	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232
65		24	60,884094 55,815892	317	191	603,0	<44,4	0,0	<3,37	±121	±29,2	–	±3,37
66		23_2	60,837712 55,816871	20	19	3,0	0,0	0,0	0,0	–	–	–	–
67		PR6L	60,830631 55,822384	46	28	2,4	47,5	0,0	6,1	±1,99	±30,8	–	±4,35
68	25 июля 2023	28	60,959932 55,811673	87	58	108,0	109,0	<8,13	6,2	±22	±40	±5,43	±4,37
69		PR5R	60,968132 55,811285	68	47	53,9	109,0	0,0	<8,10	±11,0	±39	–	±4,12
70		PR6R	60,974629 55,824282	64	47	51,9	65,9	0,0	<3,94	±10,5	±32,9	–	±3,67
71		34	60,965350 55,823241	73	50	21,9	217,0	<9,70	10,9	±5,3	±58	±6,05	±5,3
72		PR7R	61,005389 55,835646	93	61	3,0	598,0	0,0	30,3	–	±132	–	±8,8
73		40	60,995698 55,834176	77	45	61,9	189,0	<8,52	4,4	±12,5	±53	±5,24	±4,17
74		39	60,976417 55,833909	88	48	74,6	226,0	8,7	7,1	±14,9	±60	±5,96	±4,48
75		33	60,950007 55,823832	102	64	102,0	251,0	<9,64	10,4	±20	±65	±6,00	±5,2
76		38	60,956365 55,834404	83	59	14,5	286,0	<10,4	15,7	±4,1	±72	±6,6	±6,1
77		43	60,953717 55,844815	88	59	66,5	248,0	0,0	10,9	±13,4	±64	–	±5,3

Продолжение табл. 3.1

п/п	Дата измерения	Код точки	Долгота / широта	МАЭД, нЗв/ч		Удельная активность, Бк/кг				Δ удельной активности, %			
				на пов-ти почвы	на 1 м над пов-тью	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232
78		42	60,931139 55,848593	122	83	137,0	159,0	<7,39	7,4	±27	±48	±5,52	±4,49
79		45	60,907083 55,855826	136	83	221,0	156,0	<7,04	6,3	±44	±47	±5,36	±4,37
80	27 июля 2023	37	60,942637 55,835307	119	77	129,0	270,0	0,0	10,1	±26	±67	–	±5,1
81		32	60,927415 55,822477	180	114	313,0	125,0	0,0	<2,65	±63	±41	–	±2,65
82		25	60,912830 55,812717	429	220	898,0	130,0	<10,4	5,5	±180	±44	±5,5	±4,30
83		26	60,927191 55,813699	190	111	329,0	182,0	0,0	7,8	±66	±52	–	±4,52
84		PR8R	60,999788 55,842829	118	54	118,0	392,0	8,6	25,2	±24	±93	±7,76	±7,9
85		27	60,946504 55,812287	102	50	140,0	173,0	<11,1	7,8	±28	±51	±5,8	±4,55
86		44	60,984532 55,846908	86	49	82,7	207,0	0,0	11,9	±16,5	±56	–	±5,4
87	01 августа 2023	PR9R	61,004875 55,854635	93	61	61,5	339,0	<7,27	16,7	±12,7	±81	±6,51	±6,3
88		49	60,999140 55,855231	99	63	74,0	304,0	0,0	22,8	±14,8	±75	–	±7,4
89		PR10R	61,014892 55,864985	57	39	31,4	68,0	<5,00	<6,01	±6,8	±33,6	±4,69	±3,90
90		PR11R	61,021816 55,873427	84	57	36,8	290,0	<10,6	16,2	±8,2	±72	±6,7	±6,2

Продолжение табл. 3.1

п/п	Дата измерения	Код точки	Долгота / широта	МАЭД, нЗв/ч		Удельная активность, Бк/кг				Δ удельной активности, %			
				на пов-ти почвы	на 1 м над пов-тью	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232
91		PR12R	61,030731 55,881517	113	71	30,9	388,0	18,6	29,9	±7,4	±93	±9,3	±8,8
92		PR13R	61,039177 55,890284	83	55	36,7	284,0	0,0	16,3	±8,2	±71	–	±6,2
93		70	61,039847 55,898144	83	56	9,9	322,0	7,4	15,4	±3,62	±79	±6,78	±6,1
94		71	61,063311 55,898036	70	48	50,9	151,0	0,0	12,1	±10,5	±47	–	±5,5
95		PR14R	61,068559 55,902146	52	39	30,1	43,4	0,0	<5,78	±6,5	±29,9	–	±3,87
96		PR15R	61,070584 55,910372	74	50	46,4	271,0	<5,79	8,8	±9,8	±68	±5,59	±4,63
97		PR16R	61,073308 55,917113	80	54	28,4	299,0	7,2	10,8	±6,6	±74	±6,28	±5,3
98		PR17R_1	61,070456 55,927222	83	56	26,6	328,0	0,0	19,6	±6,3	±79	–	±6,8
99	03 августа 2023	PR7L	60,863069 55,834187	66	45	30,6	139,0	6,5	9,7	±6,8	±46	±6,10	±5,05
100		35	60,874711 55,833911	86	59	58,0	225,0	<8,35	14,4	±11,9	±60	±6,34	±5,9
101		36	60,891278 55,834346	130	77	162,0	240,0	<6,60	6,5	±32	±62	±5,37	±4,40
102		41	60,892391 55,849387	97	60	131,0	149,0	<5,69	4,2	±26	±46	±5,02	±4,14
103		45	60,907133 55,854441	139	81	198,0	218,0	<5,67	7,7	±40	±58	±5,44	±4,52

Продолжение табл. 3.1

п/п	Дата измерения	Код точки	Долгота / широта	МАЭД, нЗв/ч		Удельная активность, Бк/кг				Δ удельной активности, %			
				на пов-ти почвы	на 1 м над пов-тью	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232
104		46	60,924848 55,853929	155	95	203,0	194,0	0,0	7,7	±41	±54	–	±4,52
105		51	60,932624 55,866563	207	128	320,0	255,0	<7,30	10,7	±64	±65	±5,89	±5,2
106		50	60,910573 55,864586	111	62	151,0	221,0	0,0	8,9	±30	±58	–	±4,63
107		PR10L	60,905645 55,864624	96	59	132,0	171,0	0,0	8,0	±26	±49	–	±4,54
108		PR9L	60,878964 55,854948	74	49	53,0	180,0	<9,75	7,4	±10,9	±52	±5,68	±4,50
109		PR8L	60,873989 55,846429	67	48	9,0	275,0	0,0	13,0	±3,26	±69	–	±5,6
110	04 августа 2023	PR12L	60,908318 55,884367	79	54	44,1	239,0	<7,32	14,9	±9,4	±63	±6,33	±6,0
111		PR11L	60,896839 55,872771	49	39	18,4	55,2	0,0	<6,05	±4,3	±30,3	–	±3,90
112		54	60,901523 55,872599	58	46	61,3	<31,8	0,0	<3,21	±12,3	±28,0	–	±3,21
113		PR13L	60,940781 55,890334	112	71	170,0	146,0	0,0	7,5	±34	±45	–	±4,49
114		63	60,946862 55,889964	145	100	226,0	152,0	0,0	11,0	±45	±47	–	±5,3
115		PR14L	60,946284 55,904722	76	51	16,7	360,0	0,0	13,3	±4,5	±85	–	±5,7
116		67	60,959311 55,903595	129	73	231,0	123,0	0,0	8,0	±46	±42	–	±4,54

Продолжение табл. 3.1

п/п	Дата измерения	Код точки	Долгота / широта	МАЭД, нЗв/ч		Удельная активность, Бк/кг				Δ удельной активности, %			
				на пов-ти почвы	на 1 м над пов-тью	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232
117		PR16L	60,985802 55,918368	127	78	59,2	455,0	9,9	29,1	±12,5	±106	±8,16	±8,6
118		76	60,996982 55,916246	139	78	119,0	411,0	<18,8	26,0	±24	±102	±9,6	±9,1
119		76_2	61,015226 55,919442	93	63	19,8	428,0	<9,21	17,8	±5,6	±103	±8,10	±7,5
120		77_2	61,032345 55,914373	86	55	41,3	233,0	<14,0	11,4	±9,3	±68	±7,7	±6,0
121	11 августа 2023	59	60,937099 55,882634	130	81	188,0	129,0	<6,89	6,7	±38	±43	±5,41	±4,42
122		60	60,955912 55,881313	194	96	342,0	127,0	<9,85	<6,72	±68	±43	±5,13	±3,99
123		61	60,980462 55,882514	125	72	146,0	229,0	<10,7	10,4	±29	±61	±6,1	±5,2
124		62	61,002566 55,879682	96	55	50,6	287,0	10,0	16,8	±10,8	±73	±7,1	±6,3
125		58	61,008017 55,874931	67	44	73,5	55,7	0,0	5,0	±14,7	±30,7	–	±4,22
126		57	60,987622 55,872846	96	65	53,9	300,0	<9,70	15,3	±11,3	±74	±6,51	±6,1
127		56	60,960352 55,877583	179	116	265,0	162,0	0,0	10,5	±53	±49	–	±5,2
128		55	60,933794 55,872864	182	115	286,0	179,0	<7,11	<7,54	±57	±51	±5,03	±4,07
129	14 августа 2023	77	61,028328 55,917169	80	56	57,5	150,0	0,0	11,4	±11,7	±47	–	±5,3

Продолжение табл. 3.1

п/п	Дата измерения	Код точки	Долгота / широта	МАЭД, нЗв/ч		Удельная активность, Бк/кг				Δ удельной активности, %			
				на пов-ти почвы	на 1 м над пов-тью	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232
130		76_3	61,015237 55,919361	91	65	25,5	344,0	7,8	16,8	±6,1	±83	±6,94	±6,3
131		72	60,985503 55,918396	114	76	45,9	402,0	10,4	24,0	±10,1	±95	±7,7	±7,7
132		PR15L	60,967542 55,907081	77	54	28,9	208,0	0,0	10,2	±6,5	±56	–	±5,1
133		68	60,966553 55,901953	200	68	372,0	183,0	0,0	6,3	±74	±52	–	±4,37
134		77_3	61,033485 55,913677	77	40	11,9	217,0	9,9	17,3	±3,8	±60	±7,09	±6,4
135	30 сентября 2024	53	60,984884 55,864682	108	69	79,9	397,0	10,6	18,0	±16	±92	±6,8	±6,4
136		52	60,961988 55,864007	158	98	175,5	366,0	9,5	10,9	±36	±80	±6,2	±5,2
137		47	60,953850 55,853980	122	69	124,9	473,0	<10	20,3	±25	±107	–	±6,8
138		48	60,977075 55,855043	106	70	74,7	227,0	<11	10,1	±15,1	±59	–	±1,0
139	14 августа 2025	74	61,036777 55,910262	56	42	37,6	52,8	0,0	5,3	±7,9	±29	–	±3,86
140		75	61,057692 55,908155	56	35	37,7	44,8	0,0	4,7	±7,9	±37	–	±4,19
141		78	61,052370 55,917022	70	46	28,0	220,0	0,0	14,1	±6,4	±58	–	±5,8
142	09 августа 2023	ПОЧВА 2	60,938145 55,773703	95	59	135,0	114,0	0,0	10,4	±27	±49	–	±6,1

Продолжение табл. 3.1

п/п	Дата измерения	Код точки	Долгота / широта	МАЭД, нЗв/ч		Удельная активность, Бк/кг				Δ удельной активности, %			
				на пов-ти почвы	на 1 м над пов-тью	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232
143		ПОЧВА 3	60,917082 55,769947	80	54	80,4	151,0	0,0	9,8	±16,1	±47	–	±5,06
144		ПОЧВА 4	60,884765 55,780372	473	236	989,0	<58,7	0,0	<3,37	±198	±30,2	–	±3,37
145		ПОЧВА 5	60,885261 55,780469	629	324	1410,0	89,2	<6,25	0,0	±280	±37,8	±4,50	–
146		ПОЧВА 6	60,882749 55,779434	283	223	415,0	102,0	0,0	<7,62	±83	±39	–	±4,06
147		ПОЧВА 7	60,882446 55,778628	384	207	660,0	118,0	0,0	<3,24	±132	±41	–	±3,24
148		ПОЧВА 8	60,884369 55,777533	384	232	676,0	136,0	0,0	<3,56	±135	±43	–	±3,56
149		ПОЧВА 9	60,869107 55,781823	660	346	1320,0	51,9	6,2	5,7	±260	±34,6	±5,61	±4,33
150		ПОЧВА 10	60,871604 55,780650	418	230	698,0	<35,8	<8,79	6,0	±140	±31,6	±5,45	±4,35
151		ПОЧВА 11	60,873925 55,780272	852	515	1800,0	140,0	<5,50	<4,97	±360	±45	±4,60	±3,79
152		ПОЧВА 12	60,926368 55,785555	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
153		ПОЧВА 13	60,825670 55,794312	57	40	3,0	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
154		ПОЧВА 14	60,810812 55,767909	58	39	21,1	146,0	5,7	4,6	±5,0	±46	±5,45	±4,21
155		ПОЧВА 15	60,826957 55,767364	68	48	43,4	192,0	<6,08	<8,07	±9,2	±53	±5,02	±4,12

Продолжение табл. 3.1

п/п	Дата измерения	Код точки	Долгота / широта	МАЭД, нЗв/ч		Удельная активность, Бк/кг				Δ удельной активности, %			
				на пов-ти почвы	на 1 м над пов-тью	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232
156		ПОЧВА 16	60,843790 55,767616	55	39	32,2	83,5	<8,0	<8,0				
157		ПОЧВА 17	60,843790 55,767616	270	124	531,3	290,0	<10,3	<9,89	±52	±79	±7,2	±5,83
158		ПОЧВА 18	60,843886 55,768477	353	189	620,0	284,0	7,9	6,2	±124	±71	±5,80	±4,38
159		ПОЧВА 19	60,859397 55,767804	1349	619	3250,0	315,0	<11,8	6,4	±312	±88	±7,6	±6,11
160		ПОЧВА 20	60,859104 55,768741	1451	700	3460,0	43,2	<8,77	<4,66	±690	±34,8	±4,81	±3,77
161		ПОЧВА 21	60,873107 55,768344	388	229	800,0	224,0	<8,04	<7,26	±79	±68	±6,73	±5,55
162		ПОЧВА 22	60,873845 55,768566	788	407	1910,0	149,0	0,0	<4,47	±380	±46	–	±3,73
163		ПОЧВА 23	60,871384 55,768821	656	367	1180,0	62,4	<4,50	0,0	±240	±32,2	±4,35	–
164		ПОЧВА 24	60,871397 55,768181	365	209	718,8	121,0	0,0	<5,07	±72	±52	–	±5,07
165		ПОЧВА 25	60,889943 55,768617	127	85	234,4	241,0	<7,76	9,2	±53	±71	±7,67	±6,4
166		ПОЧВА 26	60,891389 55,767159	159	91	309,0	203,0	0,0	11,2	±62	±55	–	±5,3
167	14 августа 2023	ПОЧВА 27	60,944498 55,812590	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
168		ПОЧВА 28	61,015161 55,919369	106	65	23,4	750,0	14,6	21,8	±4,5	±170	±10,1	±8,8

Окончание табл. 3.1

п/п	Дата измерения	Код точки	Долгота / широта	МАЭД, нЗв/ч		Удельная активность, Бк/кг				Δ удельной активности, %			
				на пов-ти почвы	на 1 м над пов-тью	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232
169		ПОЧВА 29	60,985319 55,918227	117	75	18,3	888,0	<13,8	43,4	±4,8	±197	±11,4	±12,8
170		ПОЧВА 30	60,966547 55,902018	107	68	51,0	585,0	<14,8	22,3	±4,1	±137	±9,6	±8,9

н/д – данные не прошли валидацию, не используются для последующего анализа.

В табл. 3.2–3.5 приведены основные описательные статистики выборок, которые используются и обсуждаются в рамках данной статьи: *in situ определения УА* ^{137}Cs $\{^{is}SA_{Cs,j}\}$, *МАЭД на поверхности почвы* $\{DR^{h=0}_{j}\}$, *МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы в точках* $\{^{pnt}DR^{h=1}_{j}\}$ и *МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы на маршрутах* $\{^{tr}DR^{h=1}_{k}\}$. Для выборки $\{^{tr}DR^{h=1}_{k}\}$ характеристики приводятся для всей совокупности, без разделения по предложенным географическим локациям на территории ВУГЗ. Функции плотности распределений относительных частот значений указанных выборок определяются неоднозначно, но они наиболее близки к логнормальной аппроксимации (см. рис. 3.4).

Таблица 3.2. Статистические характеристики выборки *in situ определения УА* ^{137}Cs

Параметр	Все стационарные точки	Стационарные точки внутри заповедника	Стационарные точки на границе	
			левая граница	правая граница
Число измерений	168	118	27	23
Среднее значение, Бк/кг	228,7	307,2	39,4	48,3
Медианное значение, Бк/кг	67,6	119,5	28,3	31,4
Минимальное значение, Бк/кг	1,0	3,0	1,0	3,0
Максимальное значение, Бк/кг	3460,0	3460,0	170,0	155,0
Первый квартиль, Бк/кг	29,8	49,7	12,7	24,6
Третий квартиль, Бк/кг	192,0	286,0	59,2	61,5

Таблица 3.3. Статистические характеристики выборки *МАЭД на поверхности почвы*

Параметр	Все стационарные точки	Стационарные точки внутри заповедника	Стационарные точки на границе	
			левая граница	правая граница
Число измерений	168	118	27	23
Среднее значение, нЗв/ч	156,6	190,3	71,5	83,4
Медианное значение, нЗв/ч	93,0	106,0	67,0	80,0
Минимальное значение, нЗв/ч	20,0	20,0	42,0	52,0
Максимальное значение, нЗв/ч	1451,0	1451,0	127,0	134,0
Первый квартиль, нЗв/ч	73,0	86,0	56,0	70,0
Третий квартиль, нЗв/ч	135,0	179,0	79,0	93,0

Таблица 3.4. Статистические характеристики выборки *МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы в точках*

Параметр	Все стационарные точки	Стационарные точки внутри заповедника	Стационарные точки на границе	
			левая граница	правая граница
Число измерений	161	117	22	22
Среднее значение, нЗв/ч	95,2	111,4	50,0	54,6
Медианное значение, нЗв/ч	62,0	67,8	48,5	55,0
Минимальное значение, нЗв/ч	19,0	19,0	27,0	39,0
Максимальное значение, нЗв/ч	700,0	700,0	78,0	71,0
Первый квартиль, нЗв/ч	50,0	55,0	39,0	47,0
Третий квартиль, нЗв/ч	81,0	109,0	59,0	61,0

Таблица 3.5. Статистические характеристики выборки *МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы на маршрутах*

Параметр	Все данные
Число измерений	47011
Среднее значение, нЗв/ч	79,7
Медианное значение, нЗв/ч	58,0
Минимальное значение, нЗв/ч	19,0
Максимальное значение, нЗв/ч	932,0
Первый квартиль, нЗв/ч	45,0
Третий квартиль, нЗв/ч	75,0

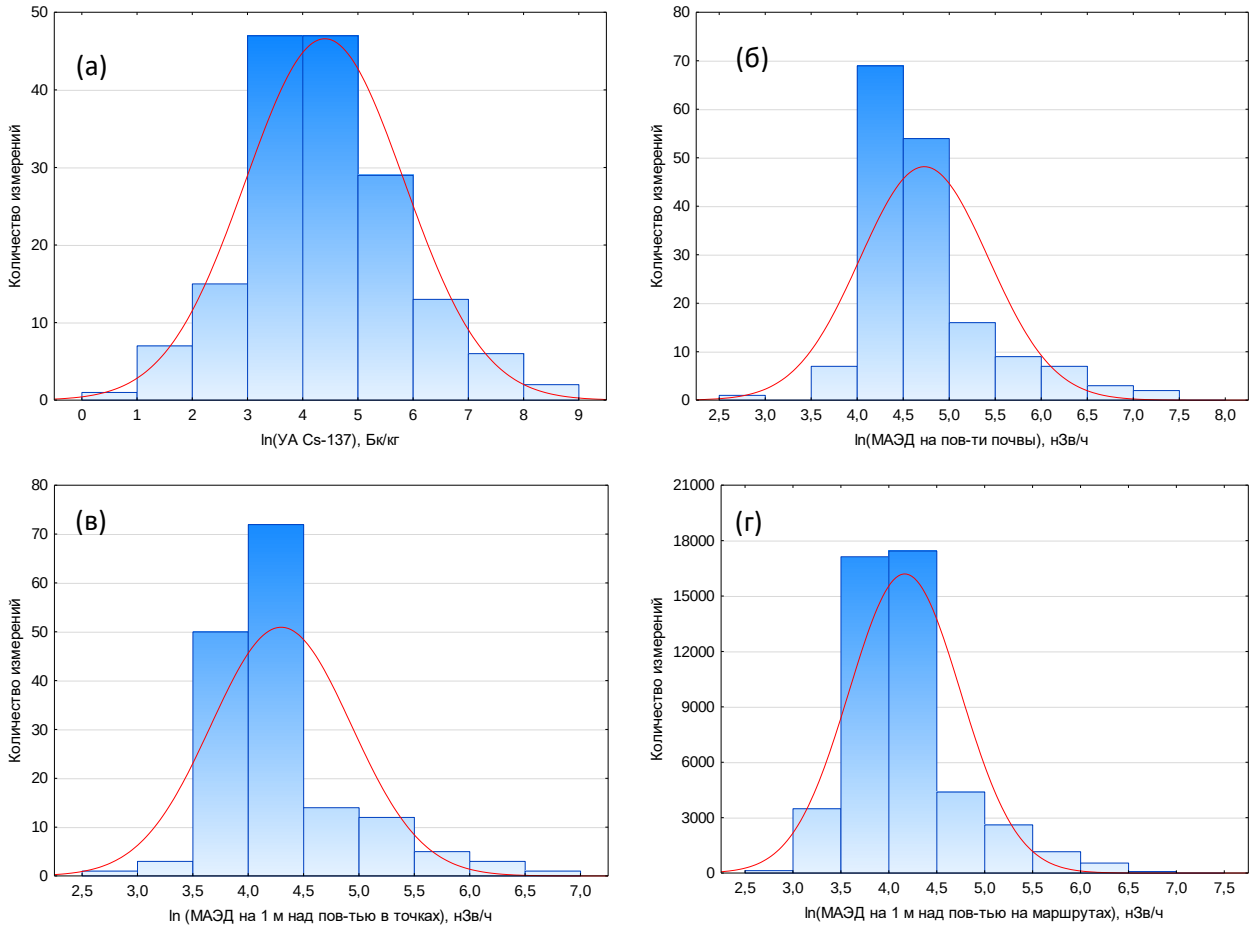


Рис. 3.4. Плотность частотных распределений логарифмов значений выборок *in situ определения УА* ^{137}*Cs* (а); *МАЭД на поверхности почвы* (б); *МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы в точках* (в); *МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы на маршрутах* (г); красная линия – нормальная аппроксимация

Контроль содержания радиоактивных веществ в приземном слое атмосферы на территории заповедника показал отсутствие значимого влияния на актуальную радиационную ситуацию за счет атмосферных выпадений радиоактивных веществ. В ходе лабораторных испытаний образцов проб воздуха в 10 точках на территории заповедника (рис. 2.12) определены значения ОА исследуемых изотопов, которые значительно ниже регламентированных нормативными документами для зоны наблюдения ФГУП «ПО «Маяк» [29]. Достоверно определены предельно низкие значения объемной активности радионуклидов в приземной атмосфере заповедника, 10^{-4}, ±20 %, Бк/м^3:

– ^{60}Co от 2,1 до 63,3;

– ^{94}Nb от 1,8 до 6,6.

Содержание в приземном слое атмосферы большинства рассмотренных радионуклидов ниже порога обнаружения использованного метода, Бк/м^3 [30]: ^{51}Cr < 1,0·10^{-3}; ^{3}H < 2,1·10^{1}; ^{14}C < 1,6·10^{1}; ^{54}Mn < 2,1·10^{-4}; ^{90}Sr < 2,9·10^{-4}; ^{137}Cs < 2,1·10^{-4}; ^{239}Pu+^{240}Pu < 3,3·10^{-4}; ^{238}Pu+^{241}Am < 3,3·10^{-4}.

4. Обсуждение

Для демонстрации возможности применения результатов радиометрических полевых исследований в решении задач, сформулированных в п. 2.7, рассмотрены корреляционные связи следующих пар выборок:

– *МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы в точках* $\{^{pnt}DR^{h=1}_j\}$ и *МАЭД на поверхности почвы* $\{DR^{h=0}_j\}$ – модель (2.3);
– *МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы в точках* $\{^{pnt}DR^{h=1}_j\}$ и *in situ определения УА* ^{137}*Cs* $\{^{is}SA_{Cs,j}\}$ – модель (2.1);
– *МАЭД на поверхности почвы* $\{DR^{h=0}_j\}$ и *in situ определения УА* ^{137}*Cs* $\{^{is}SA_{Cs,j}\}$ – модель (2.2).

Поскольку, как показано на рис. 3.4, наиболее близко к нормальному закону распределены логарифмированные значения указанных выборок, то построение эмпирических моделей для восстановления значений $\{^{is}SA_{Cs,k}\}$ должно основываться на логарифмированных данных. В этом случае корреляционные зависимости могут быть аппроксимированы простыми линейными регрессиями.

Выборка $\{DR^{h=0}_j\}$ сформирована по результатам измерений полевого спектрометра МКС-АТ6101 ДР; выборка $\{^{pnt}DR^{h=1}_j\}$ – гамма-сканера МКС-АТ6101 СМ. Подавляющее большинство значений МАЭД находится в установленном для СИ диапазоне измерений, поэтому для анализа их взаимосвязи использованы полные выборки. Для логарифмированных значений получена сильная линейная с коэффициентом детерминации R^2=0,96, что указывает на высокую прогностическую значимость (рис. 4.1). Значения МАЭД на поверхности почвы с большой точностью могут быть восстановлены по значениям МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы и наоборот.

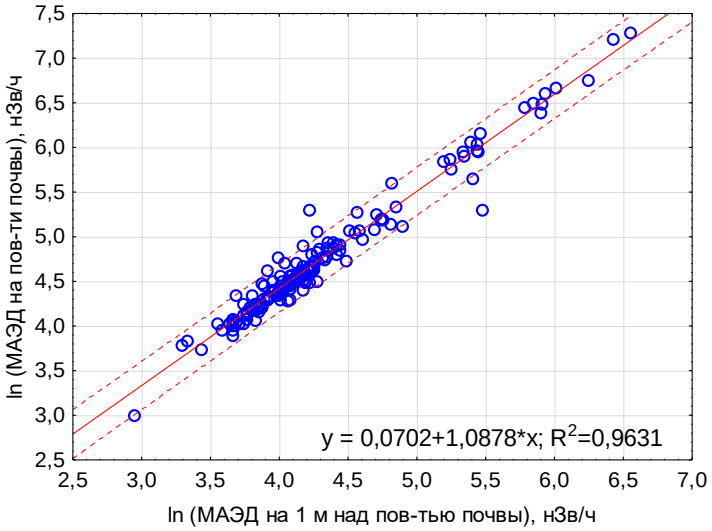


Рис. 4.1. Взаимосвязь логарифмов значений $\{DR^{h=0}_j\}$ и $\{^{pnt}DR^{h=1}_j\}$; красная линия – линия простой линейной регрессии; красный пунктир – 95 % доверительный интервал для прогнозных значений

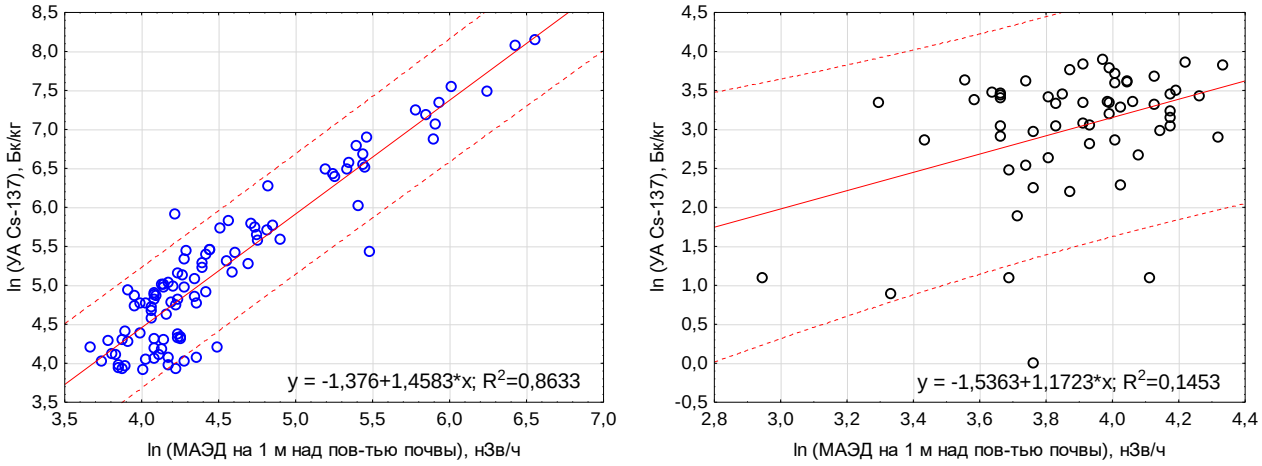
В выборке $\{^{is}SA_{Cs,j}\}$, полученной по результатам измерений *in situ* удельной активности ^{137}Cs в почве полевым спектрометром МКС-АТ6101 ДР, 64 значения (38 %) находятся ниже установленного для данного СИ диапазона измерений (< 50 Бк/кг). Поэтому при построении эмпирических моделей взаимосвязи $\{^{is}SA_{Cs,j}\}$ с $\{^{pnt}DR^{h=1}_j\}$ и $\{DR^{h=0}_j\}$ целесообразно выделить два множества по показателю УА ^{137}Cs в почве: ≥ 50 Бк/кг и < 50 Бк/кг. Оба варианта не рассматривают вклад в МАЭД от космического

излучения, собственного фона СИ, содержания естественных радионуклидов в почвах обследованных участков.

Как отмечалось в разделе 2.7, для прогнозирования значений УА ^{137}Cs в почве в более чем 47 тыс. точек на территории заповедника по результатам измерений МАЭД сканером МКС-АТ6101 СМ на высоте 1 м над поверхностью на маршрутах следует оценить корреляционную связь измеренных значений $\{^{is}SA_{Cs,j}\}$ от значений МАЭД в точках $\{^{pnt}DR^{h=1}_{j}\}$ (модель (2.1)). В метрологически обоснованном диапазоне искомая регрессия логарифмов пары $\{^{is}SA_{Cs,j}\}$ и $\{^{pnt}DR^{h=1}_{j}\}$ дает R^2=0,86 (рис. 4.2 а). При этом стандартная ошибка оценивания SE_{est} (величина 1,96·SE_{est} определяет границы 95 % доверительного интервала для прогнозных значений) составляет 0,39 Бк/кг. Таким образом, точечные оценки значений $\{^{is}SA_{Cs,k}\}$ могут быть получены с помощью уравнения:

$$\{^{is}SA_{Cs,k}\} = \exp(1{,}458*\ln\{^{tr}DR^{h=1}_{k}\} - 1{,}376). \quad (4.1)$$

Учитывая логнормальную аппроксимацию частотного распределения значений $\{^{is}SA_{Cs,j}\}$, в качестве меры погрешности полученной модели можно использовать фактор неопределенности, равный exp(SE_{est}) – коэффициент для точечных оценок, задающий интервал истинных значений. Для модели (4.1) он достигает 1,46, что довольно много и должно учитываться при использовании результатов моделирования. Также следует отметить, что в области малых значений УА ^{137}Cs в почве (< 50 Бк/кг) простая (однофакторная) регрессия практически непригодна для восстановления значений $\{^{is}SA_{Cs,j}\}$ по данным $\{^{pnt}DR^{h=1}_{j}\}$ (рис. 4.2 б).



а) б)

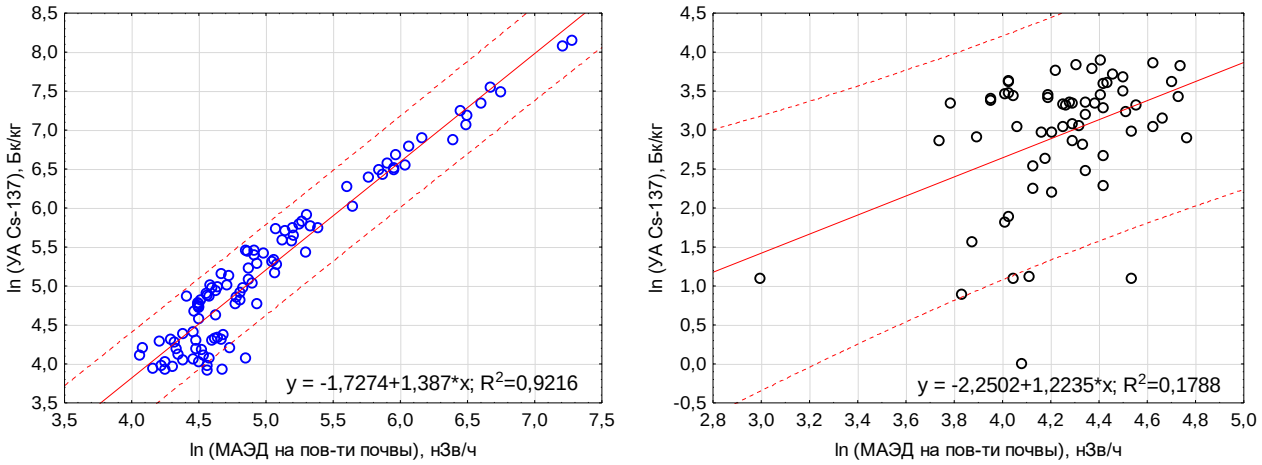
Рис. 4.2. Взаимосвязь логарифмов значений $\{^{is}SA_{Cs,j}\}$ и $\{^{pnt}DR^{h=1}_{j}\}$ в установленном диапазоне измерений УА ^{137}Cs (≥ 50 Бк/кг, слева) и вне диапазона (< 50 Бк/кг, справа); красная линия – простая линейная регрессия; красный пунктир – 95 % доверительный интервал для прогнозных значений

Восстановление УА ^{137}Cs в почве возможно также по результатам измерений МАЭД на поверхности почвы (модель (2.2)). Поскольку значения $\{DR^{h=0}_{j}\}$ и $\{^{pnt}DR^{h=1}_{j}\}$ сильно взаимосвязаны, а в измерениях на поверхности минимизированы дополнительные погрешности, присущие измерениям над поверхностью, можно ожидать, что данный способ будет более точным по сравнению с формулой (4.1). Действительно, линейная регрессия логарифмов $\{^{is}SA_{Cs,j}\}$ от логарифмов $\{DR^{h=0}_{j}\}$ в метрологически обоснованном диапазоне характеризуется коэффициентом детерминации R^2=0,92 и стандартной ошибкой SE_{est}=0,29 Бк/кг (рис. 4.3 а). В этом случае удельная активность ^{137}Cs в почве рассчитывается по формуле:

$$\{^{is}SA_{Cs,j}\} = \exp(1{,}387*\ln\{DR^{h=0}_{j}\} - 1{,}727), \quad (4.2)$$

а фактор неопределенности модели составляет 1,34, что также – довольно высокий показатель, но существенно ниже, чем в модели (4.1). В области малых значений УА

^{137}Cs в почве (< 50 Бк/кг) качество модели резко снижается (R^2=0,18 (рис. 4.3, б)), поскольку вариативность показателей во многом определяется другими факторами (космическим излучением, собственным фоном СИ, содержанием естественных радионуклидов).



а) б)

Рис. 4.3. Взаимосвязь логарифмов значений {$^{is}SA_{Cs,j}$} и {$DR^{h=0}_{j}$} в установленном диапазоне измерений УА ^{137}Cs (≥ 50 Бк/кг, слева) и вне диапазона (< 50 Бк/кг, справа); красная линия – простая линейная регрессия; красный пунктир – 95 % доверительный интервал для прогнозных значений

Сравнение полученных эмпирических моделей, предназначенных для восстановления значений удельной активности ^{137}Cs в почве, по основным статистическим показателям (R^2 и фактор неопределенности) показывает, что формально в качестве предиктора предпочтительнее использовать результаты измерений МАЭД на поверхности почвы {$DR^{h=0}_{j}$}. Однако в абсолютных значениях доверительная точность прогнозов сопоставима, обе модели с определенными допущениями могут использоваться для главной цели исследования – оценки запасов идентифицированных радионуклидов в почвах территории ВУГЗ.

5. Выводы

Выполненные полевые исследования характеристик гамма-поля на территории объекта ядерного наследия площадью более 14 тыс. га (при частоте распределения в среднем 1 стационарная точка на ~1,22 км^2) позволили сформировать массив данных, состоящих из выборок, в каждой из которых 170 значений:

- *in situ* определения УА ^{137}Cs;
- *in situ* определения УА ЕРН;
- МАЭД на поверхности почвы;
- МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы в точках.

Из первичного материала исключены только некорректные записи, не превышающие 1,18 % от совокупности данных по 170 точкам измерения in situ и точкам отбора проб почвы. Измерения МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы вне стационарных точек по маршруту следования оператора объединены в выборку, превышающую 47 тыс. значений. В результате отбора проб почвы в отдельных точках сформированы две выборки по 30 значений в каждой:

- лабораторные определения УА ^{137}Cs;
- лабораторные определения УА ^{90}Sr.

Все полученные значения МАЭД выборок *МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы* и *МАЭД на поверхности почвы* находятся в установленном для СИ диапазоне измерений мощности дозы гамма-излучения. Часть результатов измерений *in situ* УА

гамма-излучающих радионуклидов находится ниже установленных для полевого спектрометра (МКС-АТ6101ДР) значений диапазона измерений, а именно:

^{137}Cs – в 64 точках исследования, или 38,1 % значений;

^{40}K – в 30 точках исследования, или 18,0 % значений;

^{226}Ra – в 160 точках исследования, или 95,2 % значений;

^{232}Th – в 133 точках исследования, или 80,1 % значений.

Функции плотности распределений относительных частот значений измеренных параметров гамма-поля на территории ВУГЗ наиболее близки к логнормальной аппроксимации.

Сформированные выборки могут быть использованы для обоснования эмпирической модели, позволяющей по измеренным в 47,0 тыс. точек значениям МАЭД на высоте 1 м восстановить значения УА ^{137}Cs в почве *in situ*. Консервативно предполагается, что статистические характеристики выборок МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы в точках и на маршрутах тождественны друг другу.

Рассмотрены два варианта эмпирической модели для восстановления значений УА ^{137}Cs в почве по МАЭД на поверхности почвы и высоте 1 м над поверхностью. Статистически более предпочтительной для последующего использования с целью оценки запаса радионуклидов в почвах заповедника является модель, основанная на выборках *in situ определения УА ^{137}Cs*, *МАЭД на поверхности почвы*.

Контроль содержания радиоактивных веществ в приземном слое атмосферы на территории заповедника показал отсутствие значимого влияния на актуальную радиационную ситуацию за счет атмосферных выпадений радиоактивных веществ. Содержание в приземном слое атмосферы большинства рассмотренных радионуклидов ниже порога обнаружения использованным методом, Бк/м^3: ^{51}Cr < $1{,}0\cdot10^{-3}$; ^{3}H < $2{,}1\cdot10^{1}$; ^{14}C < $1{,}6\cdot10^{1}$; ^{54}Mn < $2{,}1\cdot10^{-4}$; ^{90}Sr < $2{,}9\cdot10^{-4}$; ^{137}Cs < $2{,}1\cdot10^{-4}$; ^{239}Pu+^{240}Pu < $3{,}3\cdot10^{-4}$; ^{238}Pu+^{241}Am < $3{,}3\cdot10^{-4}$.

В последующих статьях цикла планируется рассмотреть:

- пространственные и временные значения мощности дозы космического излучения на территории заповедника;
- учет содержания ЕРН в почве обследованных участков заповедника для возможной коррекции сформированной эмпирической модели восстановления значения УА ^{137}Cs в почве *in situ* по данным измерений МАЭД на высоте 1 м над поверхностью почвы;
- кластеризацию значений гамма-поля для зонирования территории заповедника по величине радиационных факторов;
- характеристики гамма-поля на сопредельных с заповедником участках;
- результаты калибровки полевого спектрометра для оценки действительных значений УА ^{137}Cs по результатам измерения ^{137}Cs *in situ*.

Основная цель рассматриваемых факторов – обосновать оценку актуального запаса идентифицированных радионуклидов в почвах заповедника на основе собранного материала полевых исследований.

6. Благодарности

Авторский коллектив выражает благодарность Олегу Владиславовичу Тарасову, Максиму Евгеньевичу Васяновичу и Елене Валерьевне Антоновой за помощь в организации и проведении полевых исследований на территории ВУГЗ. Исследование выполнено за счет субсидий Минобрнауки РФ на выполнение научной темы FUMN-2024-0001.

7. Список литературы

1. К вопросу оценки объема ядерного наследия в атомной промышленности и на иных объектах мирного использования атомной энергии в России / А. А. Абрамов,

А. Н. Дорофеев, Е. А. Комаров [и др.] // Ядерная и радиационная безопасность. – 2014. – № 3(73). – С. 3–13. – EDN SXMYDJ.
2. О возможности применения комплексного показателя потенциальной опасности в качестве основы дифференцированного подхода к регулированию безопасности объектов «ядерного наследия» / А. А. Хамаза, В. В. Бочкарев, А. В. Курындин [и др.] // Ядерная и радиационная безопасность. – 2016. – № 1(79). – С. 9–17. – EDN WEMATH.
3. *Грубич, А. О.* Загрязнение почвы атмосферными выпадениями / А. О. Грубич. – Минск : ИВЦ Минфина, 2017.
4. Радиоактивные беды Урала / В. И. Уткин, М. Я. Чеботина, А. В. Евстигнеев [и др.]. – Екатеринбург : Уральское отделение РАН, 2000. – 94 с. – EDN UCPJDF.
5. Экологические последствия радиоактивного загрязнения на Южном Урале / под ред. В. Е. Соколова, Д. А. Криволуцкого. – М. : Наука, 1993. – 336 с.
6. *Алексахин, Р. М.* Миграция радионуклидов в лесных биогеоценозах / Р. М. Алексахин, М. А. Нарышкин. – М. : Наука, 1977. – 144 с.
7. *Пристер, Б. С.* Проблемы сельскохозяйственной радиоэкологии и радиобиологии при загрязнении окружающей среды молодой смесью продуктов ядерного деления / Б. С. Пристер. – Чернобыль : Институт проблем безопасности АЭС, 2008. – 320 с.
8. *da Silva Pereira, P. A.* Mapping the environment / P. A. da Silva Pereira, E. Brevik, S. Trevisani // Science of The Total Environment. – Vol. 610, 611. – 2018. – P. 17–23, ISSN 0048-9697, https://Doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.001.
9. Атлас Восточно-Уральского и Карачаевского радиоактивных следов, включая прогноз до 2047 года / под ред. Ю. А. Израэля. – М. : ИГКЭ Росгидромета и РАН, Фонд «Инфосфера» – НИА-Природа, 2013. – 140 с.
10. Метеорологические условия формирования зоны Восточно-Уральского радиоактивного загрязнения. – Екатеринбург : УрО РАН, 2003.
11. Изучение радиоэкологических, радиационно-гигиенических и социально-хозяйственных последствий массированного радиоактивного загрязнения больших площадей (1958–1984 гг.): Отчет по теме «Мираж». Т. III / сост. Л. А. Милакина, С. П. Стукалов // Библиотека журнала «Вопросы радиационной безопасности». Из архивов ПО «Маяк». – № 4. – 2005. – 132 с.
12. *Romanov, G. N.* The Kyshtym accident: causes, scale and radiation characteristics / G. N. Romanov, B. V. Nikipelov, E. G. Drozhko // Seminar on Comparative assessment of the environmental impact of radionuclides released during three major nuclear accidents: Kyshtym, Windscale, Chernobyl. Luxemburg: Commission of the European Communities, EUR 13574, 1991. – P. 25−40.
13. *Спиридонова, А. Б.* ВУРС: динамика и прогноз / А. Б. Спиридонова, Савватеева О. А. // Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна». Серия «Естественные и инженерные науки». – 2018. – №. 2 (39). – С. 35–42.
14. Радиоэкологическое исследование почвенного покрова Восточно-Уральского государственного заповедника и сопредельных территорий / Л. Н. Михайловская, И. В. Молчанова, Е. Н. Караваева [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2011. – Т. 51. – № 4. – С. 476–482.
15. Современное состояние наземных экосистем зоны Восточно-Уральского радиоактивного следа / В. Н. Позолотина, И. В. Молчанова, Е. Н. Караваева [и др.] – Екатеринбург : Гощицкий, 2008. – 204 с.
16. Current assessment of integrated content of long-lived radionuclides in soils of the head part of the East Ural radioactive trace / I. Molchanova, L. Mikhailovskaya, K. Antonov [et al.] // J. Environ. Radioact. – 2014. – Vol. 138, № 6. – P. 238−248.
17. Radioactive inventories from the Kyshtym and Karachay accidents: Estimates based on soil samples collected in the South Urals (1990–1995) / A. Aarkrog, H. Dahlgaard, S. P. Nielsen [et al.] // Sci Tot EnviRon. – 1997. – Vol. 201, № 2. – P. 137−154.
18. *Мокров, К. Ю.* Реконструкция плотности выпадений 90Sr и 137Cs в районе расположения ФГУП «ПО «Маяк» за период 1950–2020 гг. (на примере пос. Новогорный) / К. Ю. Мокров, Ю. Г. Мокров // Вопросы радиационной безопасности. – 2021. – С. 35–45.
19. Исследование процессов миграции ^{90}Sr и ^{137}Cs в элементарных ландшафтно-геохимических системах Восточно-Уральского радиоактивного следа / Е. М. Коробова, О. В. Тарасов, С. Л. Романов [и др.] // Вопросы радиац. безопасн. – 2020. – № 3. – С. 51–62.
20. Accumulation of ^{90}Sr by Betula pendula within the East Ural Radioactive Trace zone / L. N. Mikhailovskaya, V. N. Pozolotina, M. V. Modorov [et al.] // J. Environ. Radioact. – 2022. – Vol. 250. – Art. 106914.

21. Формы состояния и миграция радионуклидов в почвах Восточно-Уральского радиоактивного следа / О. В. Тарасов, О. В. Федорова, И. Г. Тананаев, В. И. Сергиенко // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2016; 1: 47–52.
22. *Mikhailovskaya, L. N.* Spatial distribution of ^{90}Sr from Different Sources in Soils of the Ural region, Russia / L. N. Mikhailovskaya, V. N. Pozolotina // Strontium Contamination in the Environment. – Cham: Springer, 2020. – 141−158 p.
23. Казаков, С. В. Исследование проблем обеспечения радиационной безопасности водных экосистем / С. В. Казаков, С. С. Уткин; Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 18-18-00028\18. – М. : «Сам Полиграфист», 2018. – 270 с. – ISBN 978-5-00077-798-5. – EDN JCVKEW.
24. Радионуклиды в экосистеме озера Тыгиш на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа / А. В. Трапезников, П. И. Юшков, В. Н. Николкин [и др.] // Экология. – 2003. – № 3. – С. 184-193. – EDN OOLZZZ.
25. Новые нетканые материалы и их применение для анализа и защиты от радиоактивных аэрозолей / В. С. Белгородский, А. К. Будыка, Е. С. Бокова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2021. – № 1 (391). – С. 73–82.
26. Полевые методы исследования радиационной обстановки в районе размещения Белорусской АЭС в предэксплуатационный период / А. А. Екидин, А. В. Васильев, М. Е. Васянович [и др.] // АНРИ. – 2020. – № 2(101). – С. 31–44. – DOI 10.37414/2075-1338-2020-101-31-44. – EDN DTUAUF.
27. Определение радионуклидного состава и оценка доз облучения населения за счет атмосферных выбросов российских АЭС / А. А. Екидин, М. Е. Васянович, А. В. Васильев [и др.] // Траектория исследований – человек, природа, технологии. – 2022. – № 2(2). – С. 53–63. – DOI 10.56564/27825264_2022_2_53. – EDN YYWYPO.
28. Приборы и методы измерения 14C (обзор) / Е. И. Назаров, А. В. Кружалов, А. А. Екидин [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2021. – № 6. – С. 8–14. – DOI 10.31857/S0032816221060185. – EDN SEAKUM.
29. Результаты контроля радиационной обстановки на территории зоны наблюдения ФГУП «ПО «Маяк» в 2023 году / Ю. Г. Мокров, Н. Б. Исаева, Т. А. Яркова, К. Ю. Мокров // Вопросы радиационной безопасности. – 2024. – № 3 (115). – С. 43–53. – EDN ARCESH.
30. Results of MonitoRing the Radiation Situation in the Surveillance Zone of the Mayak Production Association in 2023 / Yu. G. Mokrov, N. B. Isaeva, T. A. Yarkova, K. Yu. Mokrov // RadiochemistRy. – 2024. – Vol. 66, No. 5. – P. 743–751. – DOI 10.1134/S1066362224050205. – EDN OZPXML.

Сведения об авторах:

Екидин Алексей Акимович, к. ф.-м. н., в. н. с. ИПЭ УрО РАН, г. Екатеринбург. Эл. почта: ekidin@mail.ru.

Десятов Денис Дмитриевич: ИПЭ УрО РАН, м. н. с., г. Екатеринбург.

Назаров Евгений Игоревич: ИПЭ УрО РАН, к. т. н., зав. лаб., г. Екатеринбург.

Пышкина Мария Дмитриевна: ИПЭ УрО РАН, к. т. н., н. с. г. Екатеринбург.

Антонов Константин Леонидович: ИПЭ УрО РАН, к. ф.-м. н., с. н. с. г. Екатеринбург.

Пыхова Александра Владимировна: ФТИ УрФУ, аспирант, г. Екатеринбург.

Зигангиров Артур Рустемович: ООО «Агентство экологической безопасности «АЛЬФА-Х91», инженер, г. Екатеринбург.

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF THE GAMMA FIELD IN THE TERRITORY OF THE EAST URAL STATE RESERVE: READINGS FROM PORTABLE MEASURING INSTRUMENTS

A. A. Ekidin [1], D. D. Desyatov [1], E. I. Nazarov [1], M. D. Pyshkina [1], K. L. Antonov [1], A. V. Pykhova [2], A. R. Zigangirov [3]

[1] *Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, YekateRinbuRg, Russia*
[2] *URal FedeRal UniveRsity named afteR the fiRst PResident of Russia B. N. Yeltsin, YekateRinbuRg, Russia*
[3] *LLC "EnviRonmental Safety Agency "ALPHA-X91"*

This series of publications covers the results of field studies, from planning to assessing the current activity of radionuclides in the soils of the East Ural State Nature reserve. This article presents the planning and execution stages of the field studies, which yielded representative results characterizing the radioecological situation over an area of over 14,000 hectares. The article is based on field logs recording readings from calibrated gamma-field radiation measurement instruments. Only incorrect entries representing no more than 1.2% of the total data for 170 in situ measurement points and soil sampling points were excluded from the primary data. Each measurement point with fixed coordinates characterizes a single section of the reserve and its adjacent territory with an area of ~1.22 km^2. A graphical visualization of the field survey planning results was performed to understand the representativeness of the obtained primary data. The measured parameters at each point include separate groups: ambient dose equivalent rate at the soil surface and at a height of ~1 m above the surface (nSv/h); and the specific activity of cesium-137 and natural radionuclides (Bq/kg). The statistical characteristics of each parameter group were determined: distribution shape, value ranges, mean, and median values. Correlations between the parameters and possible data samples localized at individual sites were considered.

Key words: East Ural radioactive trace; nuclear legacy; nature reserve; ambient dose equivalent rate; gamma radiation; specific activity; cesium-137; profile; measurement point; field spectrometer.

References

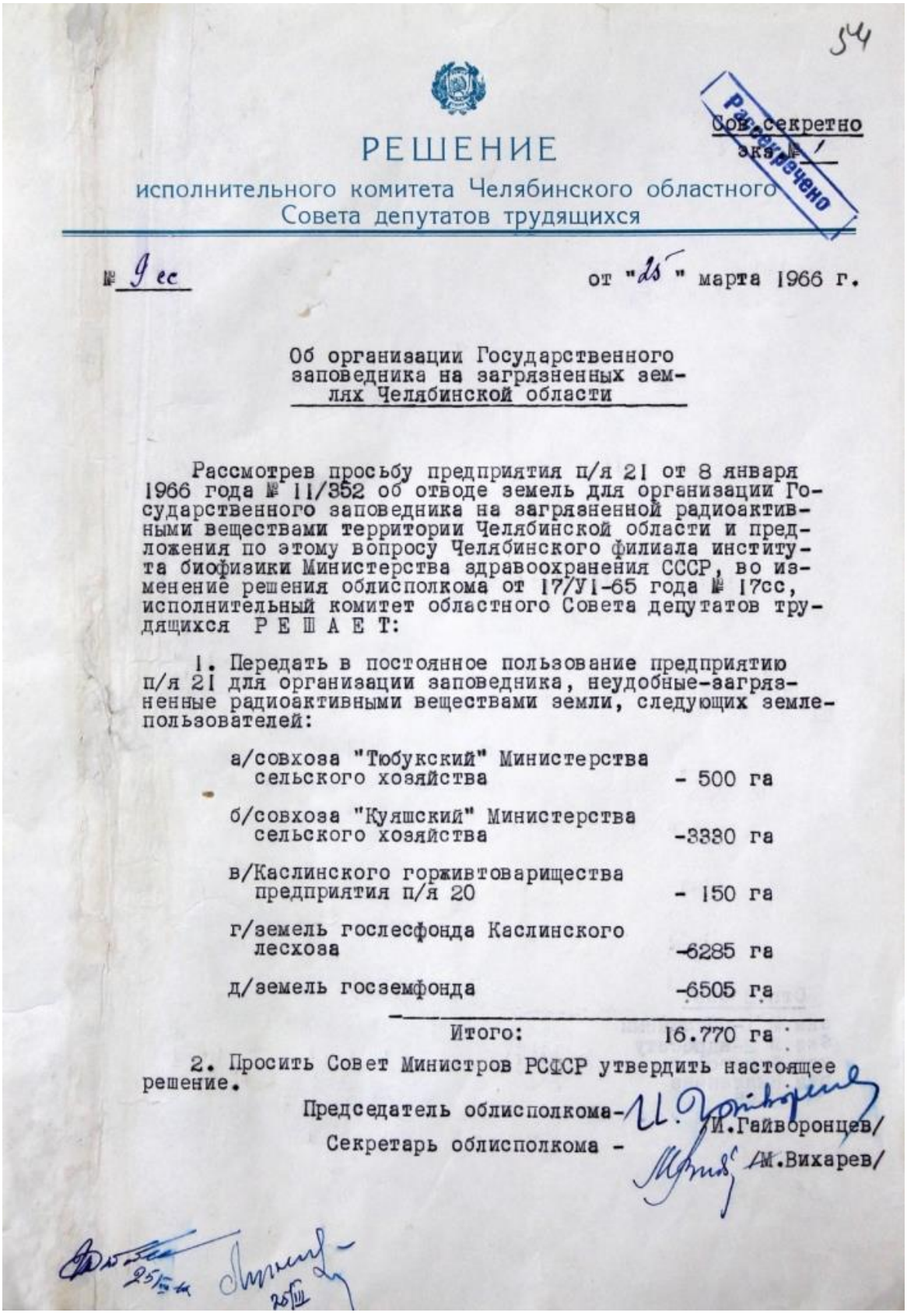
1. Concerning the Evaluation of Nuclear Legacy Volume in the Nuclear Industry and Other Facilities of Nuclear Energy Peaceful Use in Russia / A. A. Abramov, A. N. Dorofeev, E. A. Komarov [et al.] // Nuclear and Radiation Safety Journal. – 2014. – № 3(73). – P. 3–13. – EDN SXMYDJ.
2. Concerning the Possibility of Applying the Safety and Environmental Detritment Score at the Basis of the Differential Approach to the Safety Regulation of “Nuclear Legacy” Facilites / A. A. Khamaza, V. V. Bochkarev, A. V. Kuryndin [et al.] // Nuclear and Radiation Safety Journal. – 2016. – № 1(79). – P. 9–17. – EDN WEMATH.
3. Zagryaznenie pochvy atmosfernymi vypadeniyami / A. O. Grubich. – Minsk, IVC Minfina, 2017. (in Russian).
4. Radioaktivnye bedy Urala / V. I. Utkin, M. Ya. Chebotina, A. V. Evstigneev [i dr.]. – Ekaterinburg: Uralskoe otdelenie RAN, 2000. – 94 p. – EDN UCPJDF. (in Russian).
5. Ekologicheskie posledstviya radioaktivnogo zagryazneniya na Yuzhnom Urale / Pod red. V. E. Sokolova, D. A. Krivoluckogo. – M.: Nauka, 1993. – 336 p. (in Russan).
6. *Aleksahin, R. M.* Migraciya radionuklidov v lesnyh biogeocenozah / R. M. Aleksahin, M. A. Naryshkin. – M.: Nauka, 1977. – 144 p. (in Russian).
7. *Prister, B. S.* Problemy selskohozyajstvennoj radioekologii i radiobiologii pri zagryaznenii okruzhayushej sredy molodoj smesyu produktov yadernogo deleniya / B. S. Prister. – Chernobyl: Institut problem bezopasnosti AES, 2008. – 320 p. (in Russian).
8. *da Silva Pereira, P. A.* Mapping the environment / P. A. da Silva Pereira, E. Brevik, S. Trevisani // Science of The Total Environment. – Vol. 610–611. – 2018. – P. 17–23, ISSN 0048-9697, https://Doi.oRg/10.1016/j.scitotenv.2017.08.001.

9. Atlas of the East Ural and Karachay radioactive trace including forecast up to 2047 / Editor-in-chief. Yu.A. Izraelya. – M. : IGCE Roshydromet and RAS, «Infosphere» Foundation, 2013. – 140 p.
10. Meteorologicheskie usloviya formirovaniya zony Vostochno-Uralskogo radioaktivnogo zagryazneniya. – URO RAN, 2003. (in Russian).
11. Izuchenie radioekologicheskih, radiacionno-gigienicheskih, i socialno-hozyajstvennyh posledstvij massirovannogo radioaktivnogo zagryazneniya bolshih ploshadej (1958–1984 gg.): Otchet po teme «Mirazh». Tom III / Sost. L. A. Milakina, S. P. Stukalov // Biblioteka zhurnala «Voprosy radiacionnoj bezopasnosti». Iz arhivov PO «Mayak», № 4. – 2005. – 132 p. (in Russian).
12. *Romanov, G. N.* The Kyshtym accident: causes, scale and radiation characteristics / G. N. Romanov, B. V. Nikipelov, E. G. Drozhko // Seminar on Comparative assessment of the environmental impact of radionuclides released during three major nuclear accidents: Kyshtym, Windscale, Chernobyl. Luxemburg: Commission of the European Communities, EUR 13574, 1991. – P. 25−40.
13. *Spiridonova A. B.* EURT: Dynamics and Forecast / O. A. Savvateeva // Bulletin of Dubna International University for Nature, Society, and Man. Series: Natural and Engineering Sciences. – 2018. – №. 2 (39). – P. 35–42.
14. Radioecological Investigation of the Soil Cover of Eastern Urals State Radioactive Reserve and Neighboring Areas / L. N. Mihajlovskaya, I. V. Molchanova [et al.] // Radiatiom biology. Radioecology. – 2011. – Vol. 51. – № 4. – P. 476–482.
15. Sovremennoe sostoyanie nazemnyh ekosistem zony Vostochno-Uralskogo radioaktivnogo sleda / V. N. Pozolotina, I. V. Molchanova, E. N. KaRavaeva [et al.] – Ekaterinburg: Goshickij, 2008. – 204 p. (in Russian).
16. Current assessment of integrated content of long-lived radionuclides in soils of the head part of the East Ural Radioactive Trace / I. Molchanova, L. Mikhailovskaya, K. Antonov [et al.] // J. Environ. Radioact. – 2014. – Vol. 138, № 6. – P. 238−248.
17. Radioactive inventories from the Kyshtym and Karachay accidents: Estimates based on soil samples collected in the South Urals (1990–1995) / A. Aarkrog, H. Dahlgaard, S. P. Nielsen [et al.] // Sci Tot Environ. – 1997. – Vol. 201, № 2. – P. 137−154.
18. *Mokrov, K. Yu.* Reconstruction Of Area-Related ^{90}Sr And ^{137}Cs Fallout in the Vicinity of the Mayak Pa from 1950 to 2020 (a Case Study of Novogorny Settlement) / K. Yu. Mokrov, Yu. G. Mokrov // Radiation Safety Problems. – 2021. – P. 35–45.
19. Study of ^{137}Cs And ^{90}Sr Migration Processes in Elementary Landscape-Geochemical Systems of the East Ural Radioactive Trace / E. M. Korobova, O. V. Tarasov, S. L. Romanov [et al.] // Radiation Safety Problems. – 2020. – № 3. – P. 51–62.
20. Accumulation of 90Sr by Betula pendula within the East Ural Radioactive Trace zone / L. N. Mikhailovskaya, V. N. Pozolotina, M. V. Modorov [et al.] // J. Environ. Radioact. – 2022. – Vol. 250. – Art. 106914.
21. Forms of State and the Migration of Radionuclides in the Soil of the East Ural Radioactive Trace / O. V. Tarasov, O. V. Fedorova, I. G. Tananaev, V. I. Sergienko // Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences. – 2016. – № 1 (185). – P. 47–52.
22. *Mikhailovskaya, L. N.* Spatial Distribution of 90Sr from Different Sources in Soils of the Ural Region, Russia / L. N. Mikhailovskaya, V. N. Pozolotina // Strontium Contamination in the Environment. – Cham: Springer, 2020. – 141−158 p.
23. *Kazakov, S. V.* Issledovanie problem obespecheniya radiacionnoj bezopasnosti vodnyh ekosistem / S. V. Kazakov, S. S. Utkin; Izdanie osushestvleno pri finansovoj podderzhke rossijskogo fonda fundamentalnyh issledovanij po proektu № 18-18-00028\18. – Moskva: Obshestvo s ogranichennoj otvetstvennostyu "Sam PoligRafist", 2018. – 270 p. – ISBN 978-5-00077-798-5. – EDN JCVKEW. (in Russian).
24. Radionuclides in the Ecosystem of Lake Tygish in the Zone of the Eastern Ural Radioactiv Trace / A. V. TRapeznikov, P. I. Yushkov, V. N. Nikolkin [et al.] // Ekology. – 2003. – № 3. – P. 184–193. – EDN OOLZZZ.
25. New Nonwovens and their Application for Analysis and Protection Against Radioactive Aerosols / V. S. Belgorodski, A. K. Budyka, E. S. Bokova [et al.] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti. – 2021. – № 1 (391). – P. 73-82.
26. Field Methods for Studying the Radiation Situation in the Area of the Belarusian NPP in the Pre-Operational Period / A. A. Ekidin, A. V. Vasilev, M. E. Vasyanovich [et al.] // ANRI. – 2020. – № 2(101). – P. 31–44. – DOI 10.37414/2075-1338-2020-101-31-44. – EDN DTUAUF.

27. Determination of the Radionuclide Composition and Assessment of Dose of Population Exposure due to Atmospheric Emissions from Russian NPPS / A. A. Ekidin, M. E. Vasyanovich, A. V. Vasilev [et al.] // Research Trajectory. – Human, Nature, Technologies. – 2022. – № 2(2). – P. 53–63. – DOI 10.56564/27825264_2022_2_53. – EDN YYWYPO.
28. Instruments and methods for measuring ^{14}C (a review) / E. I. Nazarov, A. V. Kruzhalov, A. A. Ekidin [et al.] // Pribory i tehnika eksperimenta. – 2021. – № 6. – P. 8–14. – DOI 10.31857/S0032816221060185. – EDN SEAKUM.
29. Results of Monitoring the Radiation Environment in the Territory of the Mayak Surveillance Zone in 2023 / Yu. G. MokRov, N. B. Isaeva, T. A. Yarkova, K. Yu. Mokrov // Radiaton safety problems. – 2024. – № 3(115). – P. 43–53. – EDN ARCESH.
30. Results of Monitoring the Radiation Situation in the Surveillance Zone of the Mayak Production Association in 2023 / Yu. G. Mokrov, N. B. Isaeva, T. A. YaRkova, K. Yu. Mokrov // Radiochemistry. – 2024. – Vol. 66, No. 5. – P. 743–751. – DOI 10.1134/S1066362224050205. – EDN OZPXML.

Приложение

Постановление Совета министров РСФСР от 29 апреля 1966 года № 384-20 «Об организации Восточно-Уральского заповедника на территории Челябинской области»



54

Сов. секретно
экз. № 1

Рассекречено

РЕШЕНИЕ
исполнительного комитета Челябинского областного
Совета депутатов трудящихся

№ 9 сс от "25" марта 1966 г.

Об организации Государственного заповедника на загрязненных землях Челябинской области

Рассмотрев просьбу предприятия п/я 21 от 8 января 1966 года № 11/352 об отводе земель для организации Государственного заповедника на загрязненной радиоактивными веществами территории Челябинской области и предложения по этому вопросу Челябинского филиала института биофизики Министерства здравоохранения СССР, во изменение решения облисполкома от 17/У1-65 года № 17сс, исполнительный комитет областного Совета депутатов трудящихся Р Е Ш А Е Т:

1. Передать в постоянное пользование предприятию п/я 21 для организации заповедника, неудобные-загрязненные радиоактивными веществами земли, следующих землепользователей:

а/совхоза "Тюбукский" Министерства сельского хозяйства	- 500 га
б/совхоза "Куяшский" Министерства сельского хозяйства	-3380 га
в/Каслинского горживтоварищества предприятия п/я 20	- 150 га
г/земель гослесфонда Каслинского лесхоза	-6285 га
д/земель госземфонда	-6505 га
Итого:	16.770 га

2. Просить Совет Министров РСФСР утвердить настоящее решение.

Председатель облисполкома - /И.Гайворонцев/

Секретарь облисполкома - /М.Вихарев/


секретно инв. 62с
оз. Бердяныш
Восточно – Уральский
заповедник
м 1:50000
Карта составлена Романовым Г.
с топографической основы инв. 36с
30 декабря 1963 г