

Л.Н. Трофимец¹, Е.А. Паниди², Н.Н. Чаадаева³, Е.А. Санкова⁴, Т.Л. Иванеха⁵,
А.П. Тяпкина⁶, А.И. Петелько⁷, А.П. Александрова⁸, Г.Г. Ладнова⁹

**УСТАНОВЛЕНИЕ ОПОРНОГО ЗНАЧЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ
ЦЕЗИЯ-137 НА РАСПАХИВАЕМЫХ СКЛОНАХ
В ПЕРИГЛЯЦИАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ БАСЕЙНА ВЕРХНЕЙ ОКИ:
ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ, ГИС
И АГРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЧВЫ**

АННОТАЦИЯ

В статье обсуждаются вопросы определения опорного значения удельной активности цезия-137 чернобыльского происхождения при применении радиоцезиевого метода к оценке потерь серой лесной почвы в районах распространения микрорельефа палеокриогенного происхождения в перигляциальной области бассейна верхней Оки. Палеокриогенный микрорельеф распознаётся на весенних космических снимках, доступных в Google Earth™. Обосновывается необходимость выбора опорной площадки для конкретного поля, отличающегося по микрорельефу, экспозиции, характеру обработки почвы. Анализируются авторские данные, полученные в ходе полевых исследований в 2016–2019 гг. на 3-х сельскохозяйственных полях, расположенных на склонах северной и южной экспозиции в бассейне верхней Оки в пределах Орловского района Орловской области. Послойный отбор проб почвы на блочных повышениях в пределах опорных площадок, расположенных на водораздельных поверхностях, гамма-спектрометрический и агрохимический анализы образцов почвы позволили сделать следующие выводы. Первый — опорное значение радиоцезия в пахотном слое следует устанавливать в пределах блочных повышений на водораздельной поверхности склона или на межложбинных микроводоразделах на приводораздельной поверхности (в случае невозможности выбора опорной площадки на водораздельной поверхности). Второй — размеры опорных площадок определяются размерами блочных повышений (размеры блоков на изучаемом участке — 10–20 м). Третий — опорное значение

¹ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, кафедра географии, экологии и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, 302026, Орёл, Россия; *e-mail*: trofimec_1_n@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра картографии и геоинформатики, 10 линия ВО, д. 33, 199178, Санкт-Петербург, Россия; *e-mail*: panidi@ya.ru, e.panidi@spbu.ru

³ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, кафедра географии, экологии и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, 302026, Орёл, Россия; *e-mail*: n_chaadaeva@list.ru

⁴ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, кафедра географии, экологии и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, 302026, Орёл, Россия; *e-mail*: alena7orel@yandex.ru

⁵ Центр химизации и сельскохозяйственной радиологии «Орловский», ул. Молодёжная, д. 7, 302502, Орловский район, пос. Стрелецкий, Россия; *e-mail*: ivaneha.taras@gmail.com

⁶ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, кафедра зоологии, ул. Комсомольская, д. 95, 302026, Орёл, Россия; *e-mail*: angelikpt@mail.ru

⁷ Новосильская ЗАГЛОС, улица Семашко, 2а, 303035, Мценск, Россия; *e-mail*: zaglos@mail.ru

⁸ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт иностранных языков, кафедра английской филологии, ул. Комсомольская, д. 95, 302026, Орёл, Россия; *e-mail*: angelica.p.alexandrova@yandex.ru

⁹ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, кафедра географии, экологии и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, 302026, Орёл, Россия; *e-mail*: gladnova@yandex.ru

радиоцезия следует определять индивидуально для каждого поля, отличающегося по экспозиции и по характеру обработки почвы. На экспериментальном участке опорное значение удельной активности цезия-137 возрастает в следующем порядке: поле, расположенное на приводораздельной поверхности склона северной экспозиции с зерновым севооборотом, с регулярным внесением удобрений (130,5 Бк/кг) — поле, расположенное на водораздельной поверхности эродированного склона южной экспозиции (174,7 Бк/кг) — поле, расположенное на приводораздельной поверхности менее удобренного и менее эродированного склона северной экспозиции (180 Бк/кг).

Результаты исследования показывают, что применение радиоцезиевого метода в перигляциальных областях требует апробации принципиально нового подхода к его реализации: на этапе определения опорного значения радиоцезия необходимо учитывать полигонально-блочное строение водораздельных поверхностей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полигонально-блочный микрорельеф, удельная активность цезия-137, опорные площадки, спутниковые снимки, подвижный фосфор

Lyubov N. Trofimetz¹, Evgeny A. Panidi², Natalia N. Chaadaeva³, Elena A. Sankova⁴, Taras L. Ivaneha⁵, Angela P. Tyapkina⁶, Anatoly I. Petelko⁷, Angelica P. Alexandrova⁸, Galina G. Ladnova⁹

DETERMING THE REFERENCE VALUE OF CESIUM-137 SPECIFIC ACTIVITY ON ARABLE SLOPES IN THE PERIGLACIAL AREA OF THE UPPER OKA BASIN: APPLICATION OF SATELLITE IMAGES, GIS AND SOIL AGROCHEMICAL INDICATORS

ABSTRACT

The paper deals with the issues of determining the reference value of specific activity of cesium-137 of Chernobyl origin when applying the radiocesium method to assess the loss of gray forest soil in the areas of spread of the microrelief of paleocryogenic origin in the periglacial region of the upper Oka basin. Paleocryogenic microrelief is recognized in spring satellite imagery available on Google Earth™. The necessity of choosing a reference plot for a specific field that differs in microrelief, exposure, and the nature of soil cultivation is substantiated. The authors analyze the data, which they obtained during the field research in 2016–2019, on three agricultural fields located on the arable slopes of the northern and southern exposure in the upper Oka basin within the Orel district of the Orel Region. Three experimental plots, selected in close proximity to one

¹ Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, Department of Geography, Ecology and General Biology, Komsomolskaya str., 95, 302026, Orel, Russia; *e-mail*: trofimetc_1_n@mail.ru

² Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, 10th line VI, 33, 199178, St. Petersburg, Russia; *e-mail*: panidi@ya.ru, e.panidi@spbu.ru

³ Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, Department of Geography, Ecology and General Biology, Komsomolskaya str., 95, 302026, Orel, Russia; *e-mail*: n_chaadaeva@list.ru

⁴ Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, Department of Geography, Ecology and General Biology, Komsomolskaya str., 95, 302026, Orel, Russia; *e-mail*: alena7orel@yandex.ru

⁵ Center for Chemicalization and Agricultural Radiology “Orlovsky”, Molodezhnaya str., 7, 302502, Orel District, village Streletsky, Russia; *e-mail*: ivaneha.taras@gmail.com

⁶ Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, Department of Geography, Ecology and General Biology, Komsomolskaya str., 95, 302026, Orel, Russia; *e-mail*: angelikpt@mail.ru

⁷ Novosilskaya ZAGLOS, Semashko str., 2a, 303035, Mtsensk, Russia; *e-mail*: zaglos@mail.ru

⁸ Orel State University, Institute of Foreign Languages, Department of English Philology, Komsomolskaya str., 95, 302026, Orel, Russia; *e-mail*: angelica.p.alexandrova@yandex.ru

⁹ Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, Department of Geography, Ecology and General Biology, Komsomolskaya str., 95, 302026, Orel, Russia; *e-mail*: gladnova@yandex.ru

another, differed both in exposure and in the content of humus, labile phosphorus and radiocaesium in the arable layer. Layer-by-layer soil sampling at block elevations within the reference plots located on watershed surfaces, gamma-spectrometric and agrochemical analyzes of soil samples allowed us to draw a number of systematically important conclusions. The first is that the reference value of radiocaesium in the arable layer should be determined within block elevations on the watershed surface of the slope or on inter-valley micro-water divisions on the water-divide surface (if it is not possible to select a reference plot on the watershed surface). The second is that the dimensions of the reference plots are determined by the size of the block elevations (the sizes of blocks in the area under study are 10–20 m). The third is that the reference value of radiocaesium should be determined individually for each field that differs in exposure and in the nature of the soil treatment. In the experimental plot, the reference value of the specific activity of cesium-137 increases in the following order: a field located on the water-divide surface of the northern exposure slope, with a grain rotation, with regular fertilizing (130.5 Bq / kg) — a field located on the watershed surface of the eroded slope southern exposure (174.7 Bq / kg) — a field located on the water-divide surface of a less fertilized and less eroded slope of the northern exposure (180 Bq / kg).

The results of the study show that the use of the radiocaesium method in periglacial areas requires testing a fundamentally new approach to its implementation: at the stage of determining the reference value of radiocaesium, it is necessary to take into account the polygonal-block structure of the watershed surfaces.

KEYWORDS: polygon-block microrelief, specific activity of cesium-137, reference plots, satellite images, labile phosphorus

ВВЕДЕНИЕ

Распахиваемые склоны рассматриваемой части бассейна верхней Оки расположены в перигляциальной зоне Восточно-Европейской равнины, в области распространения серых лесных тяжёлосуглинистых почв. На территории встречаются элементы полигонально-блочного микро рельефа палеокриогенного происхождения. Особенности микро рельефа следует учитывать на этапе выбора опорных площадок (при применении радиоцезиевого метода для изучения потерь почвы). Необходимость корректного назначения местоположения опорных площадок продиктована тем обстоятельством, что при точечном изучении потерь почвы радиоцезиевым методом ошибки в установлении опорного значения радиоактивности почвы могут приводить к существенному искажению рассчитанных потерь почвы.

Содержание радиоцезия в почве зависит от того, сколько его выносится за пределы участка со смытой почвой и с урожаем высеваемых культур. Особенности микро рельефа обуславливают интенсивность смыва почвы с возвышенных участков и переотложение её в понижениях рельефа. Урожайность напрямую зависит от температурного режима и режима увлажнения почвы в пределах элементов микро рельефа, а также от качества обработки почвы. Поэтому следует считать оправданным не статистический подход к определению опорного значения радиоцезия, а подход, учитывающий как особенности латерального распределения радиоцезия в почве в зависимости от микро рельефа водораздельных поверхностей, обусловленного палеокриогенезом, так и характер обработки почвы в пределах конкретных полей.

На необходимость учёта в земледелии «реликтовой криогенной морфоскульптуры» указывали в своей монографии А.А. Величко, Т.Д. Морозова и др. [1996]. Авторы подчёркивали особую важность учёта реликтовой криогенной морфоскульптуры как при составлении карт эрозионной опасности, так и при проведении «механической планации» на территориях с такими формами рельефа. Обработка почвы на территориях с палеокриогенным

микрорельефом, подчёркивали авторы, может привести к «сдиранию» маломощного гумусового горизонта на блоках с появлением на поверхности горизонта A_2 .

О том, что микроповышения на полях глубже пахутся, лучше разделяются боронной, высев семян происходит на большую глубину, и урожай на микроповышениях более высокий, говорили Н.Н. Долгополова [1948], В.М. Фридланд [1976] и др.

В аспекте нашего исследования следует подчеркнуть, что, во-первых, по-разному будут происходить потери почвы на микроповышениях и в микропонижениях, во-вторых, вынос радиоцезия с урожаем из почв микроповышений и микропонижений также будет различным. Поэтому при применении радиоцезиевого метода [Walling, He, 1999; Голосов, 2003 и др.] особое значение имеет изучение поведения цезия-137 в элементах микрорельефа палеокриогенного происхождения, а также изучение влияния характера обработки почвы на вынос радиоцезия с урожаем.

Для установления эталонного значения радиоизотопа рекомендуется [Маркелов, 2004; Жукова, 2010 и др.] отбирать несколько проб в пределах опорного участка, рассчитывать эталонный запас радиоизотопа по выборке с небольшим коэффициентом его вариации (0,1–0,2) и рекомендовать к расчёту статистически достоверный запас радиоцезия.

Однако, как было показано выше, в условиях палеокриогенного микрорельефа говорить о статистической однородности можно, видимо, только в отношении выборки, состоящей из точек, расположенных или в пределах одного или нескольких блочных повышений или же в пределах нескольких межблочных понижений. Принятие к расчёту точек пробоотбора в пределах блочных повышений и межблочных понижений нарушает однородность выборки и увеличивает вариабельность запаса радиоцезия. Формировать выборку из точек, расположенных в пределах блочных повышений, предпочтительнее. Блочные повышения — это участки дивергенции, следовательно, завышения значения эталонного запаса радиоцезия случиться не должно. Принятие же к расчёту участков микропонижений может привести или к занижению запаса (в случае попадания точек в тальвеги понижений) или к завышению (в случае попадания точек пробоотбора в зону аккумуляции). При небольшом значении коэффициента вариации выборки, составленной из точек, расположенных на блоках и в понижениях, можно сделать вывод о том, что или микрорельеф участка не обеспечивает значимых различий в латеральном распределении радиоцезия, или при проведении полевых работ точки пробоотбора оказались в пределах однородных форм микрорельефа. Это может наблюдаться, например, если размеры площадки небольшие, а расстояние между точками пробоотбора на опорной площадке меньше, чем расстояние между элементами микрорельефа палеокриогенного происхождения (блочными повышениями и межблочными понижениями). В работе Жуковой [2010] приводится характеристика обследованных автором опорных площадок. Площадь отбора проб почвы, как видно из приведённых автором данных, составляла 50–200 м². Опорные площадки были приурочены к плакорам или пологим приводораздельным участкам склона. Лишь на одном участке в бассейне р. Локны (Тульская обл.) была выбрана опорная площадка площадью 3000 м² с местными западинами. Можно предположить, что именно эта опорная площадка была выбрана автором в пределах участка с проявлениями в рельефе элементов полигонально-блочного микрорельефа. Именно этим, видимо, объясняется большая площадь отбора проб почвы, т.к. размеры блочных повышений достаточно велики, а соблюдение требований к объёму выборки заставили автора работать с большой площадью.

На космическом снимке нашего участка (рис. 1) можно видеть, что для того, чтобы «набрать» 8–10 точек в пределах опорной площадки (как рекомендуется в работе М.В. Маркелова [2004], и при этом достичь низкой вариабельности удельной активности радиоцезия (0,1–0,2) нужно, чтоб на этой площадке «уместились» несколько блочных повышений. Блочные повышения в южном Подмоскowie, по данным В.М. Алифанова, Л.А. Гугалинской, А.Ю. Овчинникова [2010], имеют размеры 15–40 м в поперечнике. Если учесть, что размеры блочных повышений и на нашем участке составляют 10–20 и более м (что хорошо

видно на весенних космических снимках (рис.1)), то площадь опорной площадки должна быть не менее 3000–4000 м². Коэффициент вариации удельной активности цезия-137 будет зависеть от того, попали точки пробоотбора на генетически однородные элементы микро-рельефа (т.е. на блоки) или на разнородные (на блочные повышения и межблочные понижения). В нашем случае из всего набора точек мы отбирали только те, которые располагались в пределах блочных повышений. Площади участков отбора проб почвы для опорных площадок составили 0,038–0,044 км².

Помимо исследования влияния микро-рельефа на величину опорного значения радиоцезия, авторы статьи изучали влияние экспозиции склона и характера обработки почвы. Авторами установлено, что даже рядом расположенные поля, вследствие различий в урожайности зерновых культур (из-за неодинаковой обработки и неодинакового внесения удобрений), существенно отличаются по запасу радиоцезия в пахотном горизонте (из-за выноса радиоцезия с урожаем). В настоящей статье обсуждается целесообразность учёта всех перечисленных факторов.

Основная цель работы — показать, что в условиях полигонально-блочного строения водораздельных поверхностей и неодинакового характера обработки сельскохозяйственных полей установление эталонного значения активности цезия-137 на опорных площадках (при применении радиоцезиевого метода) должно осуществляться, во-первых, в пределах блочных повышений, а во-вторых, для конкретных полей, отличающихся экспозицией, а также характером обработки почвы и, соответственно, урожайностью.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основу настоящего исследования составили экспериментальные исследования на распаиваемых склонах южной и северной экспозиции в бассейне верхней Оки (водосборная поверхность р. Сухая Орлица в Орловском районе Орловской области). Особенности пространственной организации полигонально-блочного микро-рельефа устанавливались по данным космических снимков и уточнялись визуально в поле. В работе анализировались данные дистанционного зондирования Земли (снимки, доступные в Google EarthTM). Гамма-спектрометрический и агрохимический анализы проб серой лесной почвы осуществлялись в Центре химизации и сельскохозяйственной радиологии «Орловский».

Задача, поставленная в исследовании — при применении радиоцезиевого метода для оценки потерь почвы вследствие эрозии выработать рекомендации по назначению опорных площадок, которые бы наиболее правильно отражали фоновое (эталонное) значение удельной активности (запаса) цезия-137 для исследуемых полей. Иначе говоря, в работе авторы постарались показать целесообразность выбора локальных опорных площадок для каждого из полей, расположенных на склонах разной экспозиции и отличающихся разным характером обработки почвы.

Методы исследования, использованные в работе, следующие. В основу работы положены авторские результаты экспериментального изучения как латерального, так и по глубине распределения удельной активности цезия-137 в серых лесных тяжёлосуглинистых почвах трёх сельскохозяйственных полей (рис. 1). Одно поле (№ 3) расположено на склоне южной экспозиции. Два других (№ 1 и № 2) расположены на склоне северной экспозиции. Отличаются поля № 1 и № 2 уклонами и характером обработки почвы. Поле № 1 практически полностью лежит в пределах водораздельной поверхности с уклонами не более 1°. Поле № 2 расположено на склоне балки, уклоны в его пределах изменяются от 1 до 3°. Поле № 1 отличается от соседнего поля № 2 повышенной продуктивностью почвы. Оценка продуктивности почвы проводилась по результатам агрохимического анализа пахотного слоя.

Удельная активность цезия-137 чернобыльского происхождения в почвенных образцах пахотного слоя на порядок (и более) превышает удельную активность цезия-137 «бомбового» происхождения. По данным Центра «Орловский» максимальное значение активности радиоцезия в пахотном слое до аварии на ЧАЭС (в 1984 г.) составляло 10 Бк/кг. Это

позволяет считать, что, применяя радиоцезиевый метод на полях, на которых удельная активность цезия-137 достигает 100-200 Бк/кг и более, мы «работаем» с цезием-137 чернобыльского происхождения.

Помимо визуальной оценки приуроченности точек пробоотбора к блочным повышениям, по результатам анализа глубины распространения удельной активности цезия-137 осуществлялось уточнение факта «попадания» точки пробоотбора на блочные повышения. Как упоминалось выше, Долгополов, Фриндланд и др. [1974] указывали, что микроповышения на полях глубже пахутся. В связи с этим, авторы считали, что глубина проникновения цезия-137 служит косвенным подтверждением «попадания» точки в зону блочного повышения, если она превышает 20–22 см. Но это предположение, как выяснили авторы статьи, справедливо для поля с высокой продуктивностью почвы, т.е. для поля № 1 на склоне северной экспозиции. При сравнении диаграмм послойного распределения удельной активности цезия-137 более глубокое его проникновение в почву поля № 1 на склоне северной экспозиции служило доказательством «попадания» точки пробоотбора на блочное повышение (рис. 2, табл. 1).

На поле № 1 дополнительно проводился послойный анализ содержания в пахотном горизонте подвижного фосфора. Он принимался за «индикатор» качества обработки почвы. Участок поля, в почве которого содержание P_2O_5 в пахотном горизонте составляло 17–20 мг/100г, авторы считали за участок с достаточно высоким качеством обработки почвы. Кроме того, глубина проникновения подвижного фосфора в указанном диапазоне хорошо «помечает» глубину обработки почвы. Она совпадает, как выяснили авторы, с глубиной распространения удельной активности цезия-137 (равномерно распределившейся в период чернобыльских выпадений по пахотному горизонту). На полях, где в пахотном горизонте было менее 10 мг/100г, очевидно, качество обработки почвы было невысоким.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ послойного распределения радиоцезия по глубине в точках пробоотбора на водораздельной поверхности поля № 1 (рис.1) подтвердили вышеприведённое высказывание о том, что блочные повышения глубже пахутся: удельная активность цезия-137 резко снижалась на глубине 22 см в области понижений, и на глубине более 25 см — в области блочных повышений (рис. 2). Точки для установления опорного значения цезия-137 на блочных повышениях поэтому выбирались в два этапа. На первом этапе анализировались космические снимки. Анализ космических снимков (рис. 1) позволял обнаруживать блочные повышения (светлые пятна округлой формы размером 10–25 и более м). Светлый тон снимка в области блочных повышений свидетельствует о более сухой почве.

На рис. 1 видно, что на водораздельных (приводораздельных) поверхностях имеет место вариабельность удельной активности цезия-137. На поле № 1 диапазон изменения удельной активности цезия-137 (площадь участка отбора проб почвы 0,038 км²) 99–143,5 Бк/кг; на поле № 2 (площадь участка отбора проб почвы 0,044 км²) — 174–186,6 и более Бк/кг; на поле № 3 (площадь участка отбора проб почвы 0,044 км²) — 177,1–171,2 и менее Бк/кг. Видно, что поле № 1 отличается как большей вариабельностью удельной активности цезия-137 в пределах опорной площадки, так и малыми значениями удельной активности цезия-137.

На втором этапе, в полевых условиях, в ходе нивелирования (рис. 3) или в ходе визуального обследования участка, местоположение точек пробоотбора уточнялось. В выбранных точках послойно (через 2 см) отбирались пробы почвы по глубине и отправлялись на гамма-спектрометрический и агрохимический анализы.

На рис. 3 (слева) показан поперечный профиль приводораздельного участка поля № 3 на склоне южной экспозиции, построенный по результатам нивелирования. Рисунок наглядно показывает, что вариабельность удельной активности цезия-137 на водораздельной поверхности объясняется «попаданием» точек пробоотбора в тальвеги микроложбин

(где радиоактивность почвы снижена вследствие смыва), на микроводоразделы этих ложбин или на участки блочных повышений.

В условиях полигонально-блочного рельефа в бассейне верхней Оки найти опорный участок, лишённый неровностей, крайне сложно, а вероятнее всего вообще невозможно.

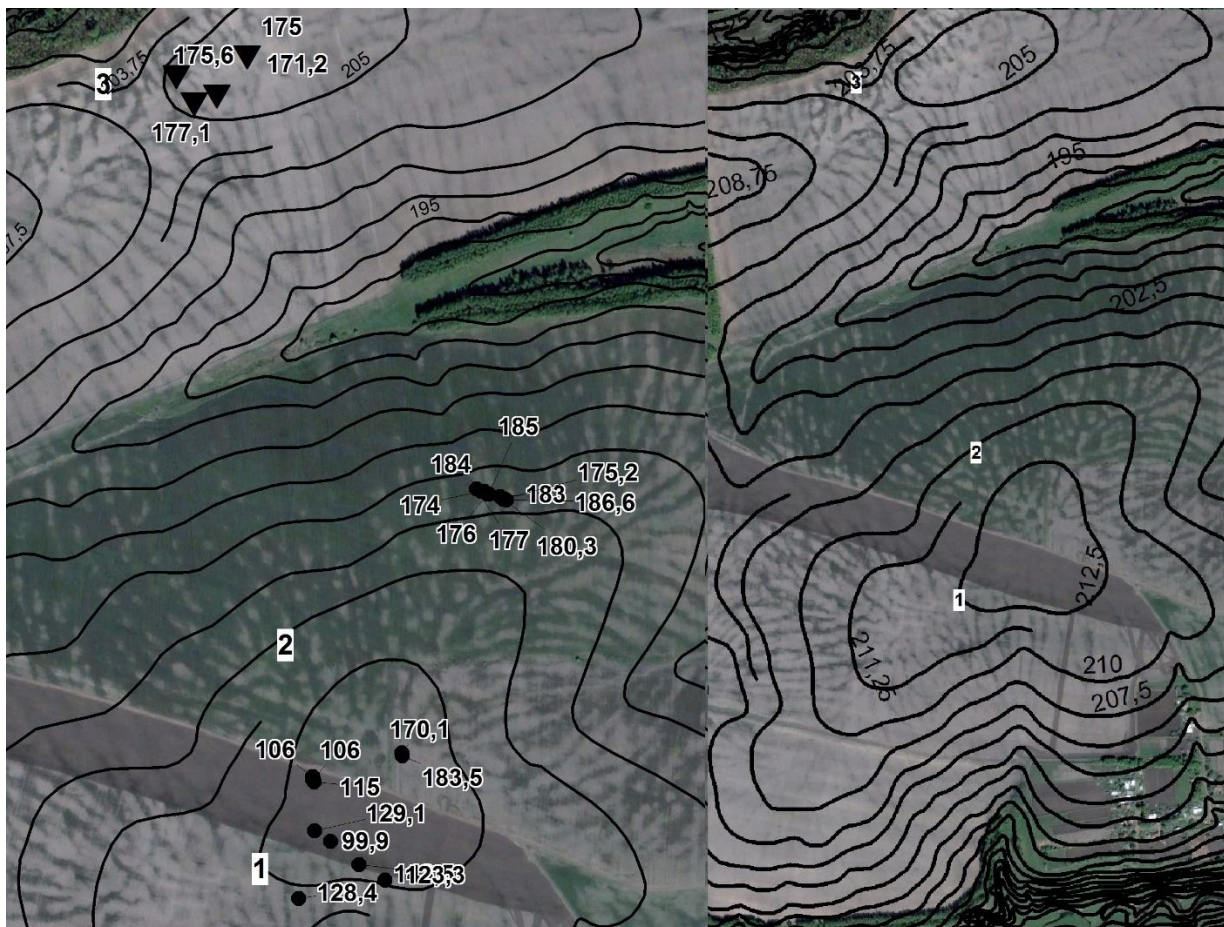


Рис. 1. Фрагменты космического снимка (снимок 16 мая 2003 г.) полей №№ 1, 2, 3. На правом фрагменте космического снимка (в нижней его части, рядом с полем № 1) — деревня Киреевка. Поля № 1 и № 2 разделяет просёлочная дорога.

На фрагменте космического снимка (слева) пунсоны — удельная активность цезия-137 в пределах участков, выбранных для назначения опорных площадок. Масштаб 1: 10 000

Fig. 1. Fragments of a satellite image (image May 16, 2003) of fields NoNo 1, 2, 3.

On the right fragment of the satellite image (in its lower part, next to field No 1) is the village of Kireyevka. Fields No 1 and No 2 are separated by a country road.

In the fragment of the satellite image (left), the markers show cesium-137 specific activity within the areas selected for the designation of reference plots. Scale 1: 10 000

Авторы статьи, как упоминалось выше, считают, что опорное значение радиоактивности почвы в этих условиях следует устанавливать по результатам послыоного отбора проб почвы на водораздельных поверхностях, и, по-возможности, для каждого из изучаемых полей. При этом в расчётах опорного значения следует учитывать значения удельной активности почвы только на блочных повышениях (или на водоразделах микроложбин). Блочные повышения характеризуются относительной стабильностью в плане развития эрозии (относительно плоский характер поверхности с небольшими уклонами).

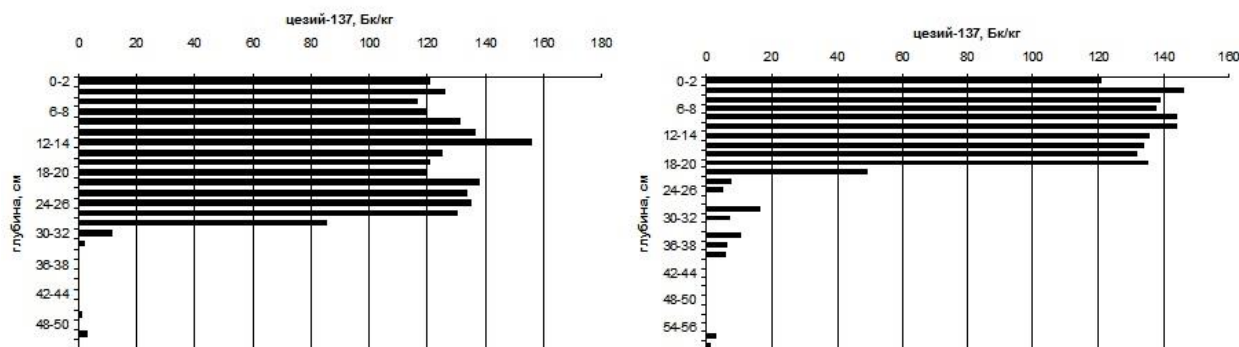


Рис. 2. Слева — диаграмма распределения цезия-137 по глубине в области блочного повышения (точка 219187) на поле № 1 северной экспозиции, справа — в области межблочного понижения на том же поле (точка 219181)
 Fig. 2. On the left is the depth distribution diagram of cesium-137 in the area of block increase (point 219187) in field No 1 of the northern exposure, on the right is in the area of interblock decrease in the same field (point 219181)

Согласно рекомендациям [Маркелов, 2004], при $C_v = 0,11-0,12$ достаточно 4-х точек пробоотбора для установления опорного значения радиоактивности. Авторы статьи, как уже упоминалось, считают, что не статистический анализ должен «определять» условия для выбора опорного значения радиоактивности в условиях полигонально-блочного микрорельефа, а учёт генезиса развития рельефа.

Точек желательно отбирать не менее 8-ми. В табл. 1 приведены данные анализа удельной активности цезия-137 в пробах почвы, послойно отобранных по глубине на опорной площадке № 1 (расположенной у дер. Киреевки). Пробы почвы отбирались как в области блочных повышений, так в межблочных понижениях. Для расчёта опорного значения должны быть приняты точки, расположенные в пределах блочных повышений. Обращает на себя внимание тот факт, что глубина проникновения радиоцезия на блочных повышениях больше, чем в межблочных понижениях. Это можно объяснить, как уже упоминалось, тем, что блочные повышения глубже пахотятся (глубина пахотного слоя на блочных повышениях составила 26–34 см, в отличие от межблочных понижений, где глубина вспашки оценена в пределах 20–22 см). Глубину, на которой отмечалось резкое снижение удельной активности цезия-137 (примерно в 2 р.), авторы статьи считали относительной границей пахотного слоя (рис. 2). Выбирались те точки, в которых резкое уменьшение удельной активности цезия-137 по глубине (оно свидетельствовало о припахивании из глубины слоя почвы, не загрязнённого радиоцезием) отмечалось на глубине более 25 см (рис. 2, табл. 1). Точки, в которых глубина проникновения радиоцезия составляла 20–22 см и менее (если точка пробоотбора попадала в тальвег понижения со смытыми почвами), были отнесены на поле № 1 к межблочным понижениям (рис. 2). Они к расчёту опорного значения радиоцезия не принимались.

Данные табл. 1 позволяют утверждать, что «недоучёт» запаса радиоцезия глубже пахотного горизонта (на блочных повышениях поля № 1 глубже 26–34 см, в области межблочных понижений — глубже 20 см) оказался незначительным (5,3–13,3 %). Исходя из этого, авторы считают, что отбирать пробы почвы до глубины максимального проникновения радиоцезия (до 50 см и более) нецелесообразно. Можно ограничиться пахотным горизонтом.

На этапе анализа распределения удельной активности цезия-137 по глубине (рис. 2, 4), окончательно выбирались точки, которые наиболее корректно могли идентифицировать опорное значение радиоцезия на блочных повышениях. В ходе анализа авторами также

было отмечено, что глубина пахоты на блочных повышениях на поле № 1 северной экспозиции больше, чем на блочных повышениях поля № 3 склона южной экспозиции (рис. 4). На поле № 3 на склоне южной экспозиции глубина пахоты на блочных повышениях не превышала 20–22 см.

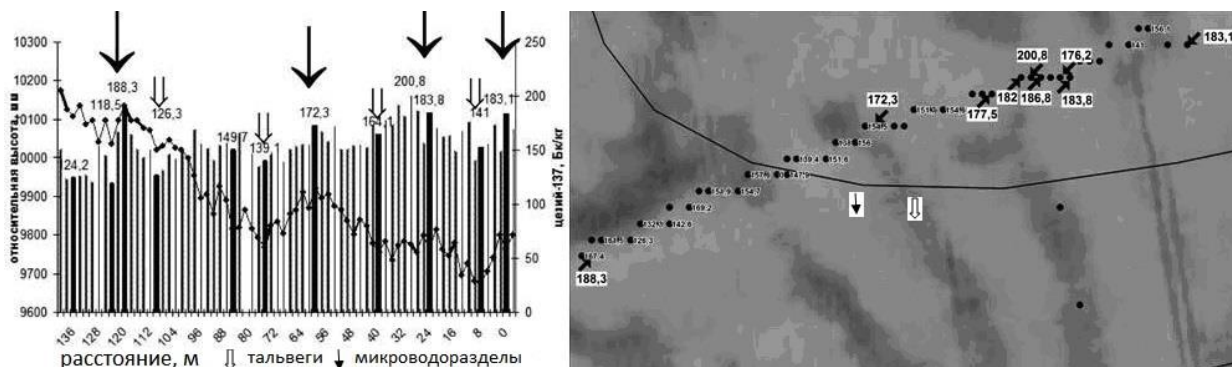


Рис. 3 Фрагмент космического снимка (справа) и поперечный профиль склона, построенный по результатам нивелирования приводораздельной части склона южной экспозиции (в пределах поля № 3) — слева. Видно, что в области межложбинных водоразделов удельная активность цезия-137 выше, нежели в тальвегах ложбин
 Fig. 3. Fragment of a satellite image (right) and the transverse profile of the slope, constructed according to the results of leveling the water-divide part of the slope of the southern exposure (within the field No 3). It can be seen that in the area of inter-valley watersheds, cesium-137 specific activity is higher than in the talwegs of hollows

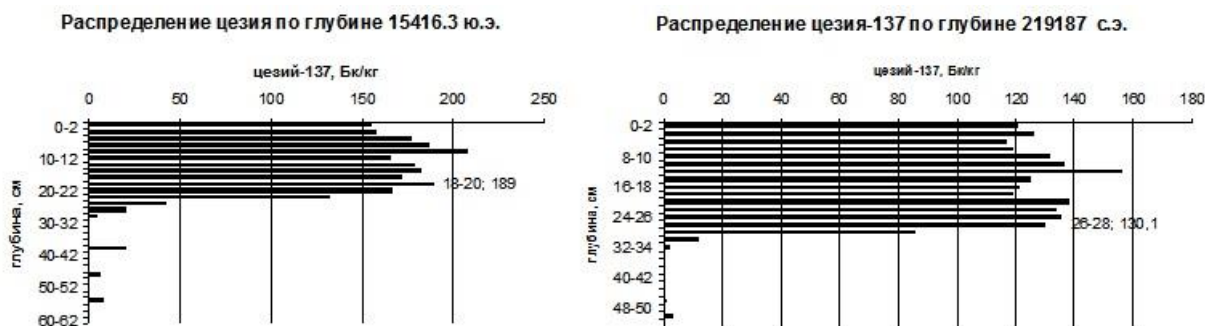


Рис. 4. Диаграммы распределения цезия-137 по глубине на блочных повышениях опорных площадок (на поле № 3 склона ю.э. (слева) и на поле № 2 с.э. (справа))
 Fig. 4. Diagrams of depth distribution of cesium-137 at block elevations of reference plots (in field No 3 of the slope of S.E. (left) and in field No 2 of N.E. (right))

Сравнение удельной активности цезия-137 на блочных повышениях опорных площадок полей № 1–3 показало следующее. Наименьшая эталонная удельная активность цезия-137 (130,5 Бк/кг) была измерена на опорной площадке поля № 1. На поле № 2 эталонное значение удельной активности цезия-137 составило 180 Бк/кг, на поле № 3 — 174,7 Бк/кг.

Если различия эталонных значений активности цезия-137 на полях № 2 и № 3 могут быть объяснены разной интенсивностью протекания эрозионных процессов на склонах северной (поле № 2) и южной (поле № 3) экспозиции, то аномально низкая удельная активность цезия-137 на поле № 1 потребовала привлечения дополнительно результатов

агрохимического анализа. Аномально низкое значение удельной активности цезия-137 в пределах опорной площадки поля № 1 может быть объяснено или особенностями локальных выпадений радионуклида цезия-137 в 1986 г. или интенсивным выносом радиоцезия с урожаем озимой пшеницы (основной культуры, высеваемой на полях № 1–3).

Табл. 1. Удельная активность цезия-137 в точках опорной площадки (поле № 1 у деревни Киреевки)
Table 1. Cesium-137 specific activity at the points of the reference plot (field No 1 near the village of Kireyevka)

№ точки	Глубина послойного отбора проб почвы (через 2 см по глубине), см	Глубина вспашки, см	Блок/понижение	% запаса цезия-137 (глубже пахотного слоя)	Удельная активность цезия-137 в пахотном слое
219181	60	20	понижение	7,5%	136,9
219182	60	26	блок	7,2%	125,1
219183	60	28	блок	8,8%	126,4
219184	56	34	блок	10,6%	143,5
219185	52	20	понижение	8,5%	109,2
219186	44	20	понижение	13,3	99,9
219187	52	28	блок	5,3%	129,1
219188	52	32	блок	10,4	128,4

Может сложиться впечатление, что на поле № 1 мы имеем дело с особенностями локальных (аномально низких) выпадений цезия-137 во время аварии на ЧАЭС в 1986 г. Тем более, что на удалении 100 м (через дорогу), на поле № 2 (на рис. 1) видны две точки пробоотбора, в которых удельная активность цезия-137 равна 170,1 и 183,5 Бк/кг (существенно выше, чем на поле № 1). По-видимому, это обстоятельство должно быть исследовано особо, но не в настоящей статье. Мы не будем обсуждать вопрос, каким образом сегодня можно установить траекторию выпадения радиоактивных осадков в 1986 г.

В настоящей статье мы рассмотрим характер обработки почвы как одну из причин низких значений радиоактивности почвы в пределах пахотного горизонта поля № 1. Авторы предположили, что характер обработки почвы, возможно, обусловил большую урожайность и, вследствие выноса с урожаем части радионуклида, обусловил меньшую удельную активность цезия-137 в пахотном горизонте на этом поле. К сожалению, ежегодных сведений об урожайности озимой пшеницы найти не удалось. Однако авторы привлекли данные Центра «Орловский» и проанализировали содержание в почве изучаемых полей некоторых агрохимических показателей. Анализировалось содержание в почве подвижного фосфора, гумуса, K_2O , pH (рис. 5, табл. 2). На рис. 5 приведены карты распределения подвижного фосфора (карты построены по результатам авторских полевых исследований) в пределах анализируемых полей.

Из рис. 5 становится очевидным, что на поле № 1, подвижного фосфора в почве в 2–3 р. больше, чем на поле № 3 и в 2–4 р. больше, чем на поле № 2.

Этот рисунок подтверждает вывод о том, что обнаруженная разница в удельной активности цезия-137 на поле № 1 и на полях № 2 и 3 в определённой степени может быть обусловлена выносом радиоцезия с урожаем озимой пшеницы. Известно, что вынос радиоцезия тем выше, чем выше урожайность. Например, при урожайности 30 ц/га вынос радиоцезия (если считать, что на поле № 1 в 1986 г. удельная активность цезия-137 в пахотном слое составляла от 200 до 300 Бк/кг) изменялся от 0,03 Бк/кг (в настоящее время) до 7 Бк/кг (в 1986–1987 гг.), т.е. в первые годы после аварии с урожаем могло быть вынесено

примерно 40–50 Бк/кг. Разница удельной активности цезия-137 на полях № 1 и № 2 сегодня составляет 40 Бк/кг, что вполне «укладывается» в пределы рассчитанного объема, вынесенного с урожаем радиоцезия.

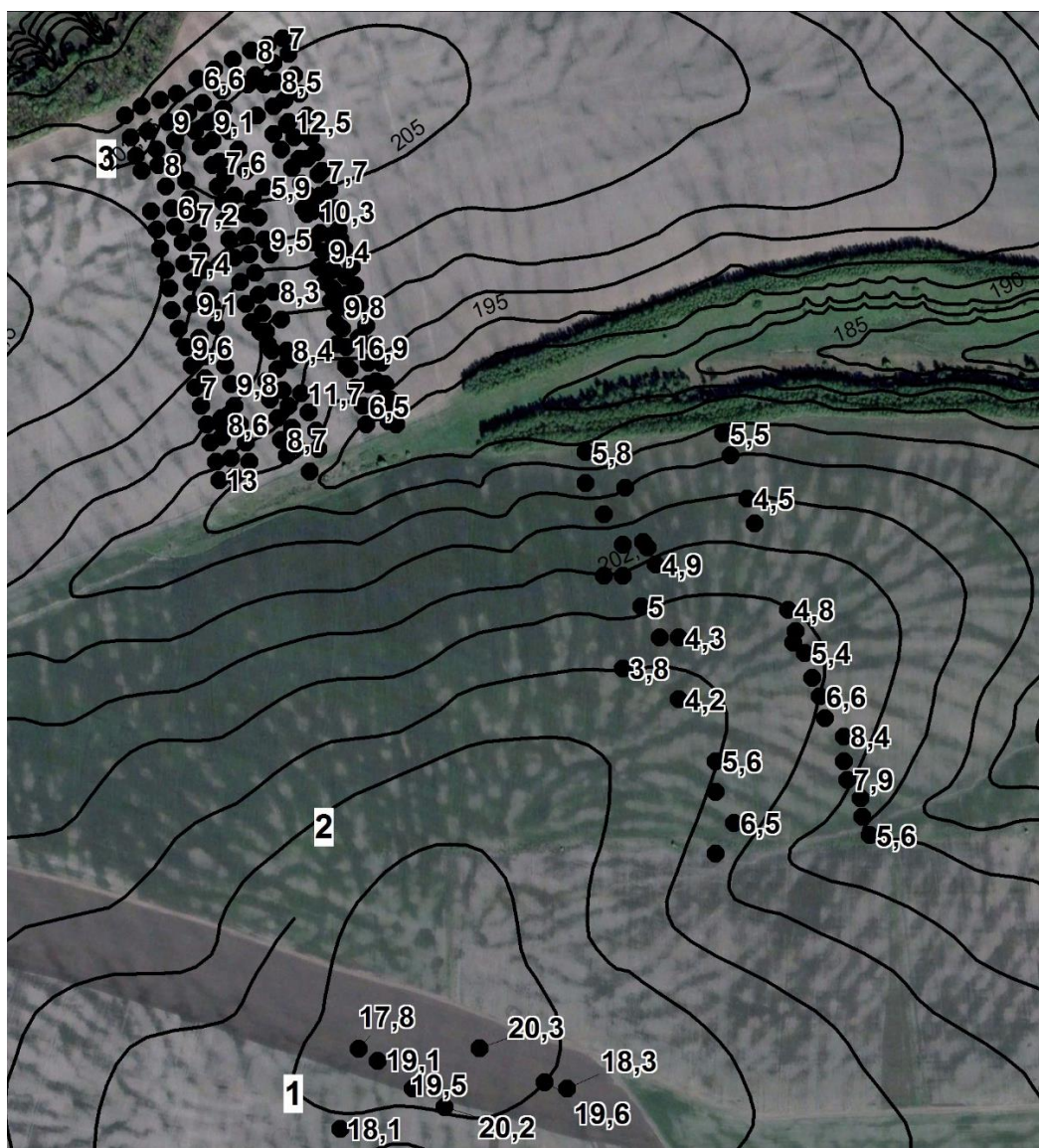


Рис. 5. Содержание подвижного фосфора в пахотном горизонте полей № 1, 2, 3
 Fig. 5. The content of labile phosphorus in the arable horizon of fields No 1, 2, 3

На рис. 5 видно, что меньше всего подвижного фосфора в почвах поля № 2. Это естественно, т.к. подъезд к полю не так удобен, как подъезд к полю № 3 и тем более к полю № 1 (вблизи деревни). Вариабельность подвижного фосфора в пахотном горизонте поля № 1 составила 17,8–20,3 мг/100г; в почвах поля № 2 — 4,2–8,4; в почвах поля № 3 — 5,9–12,5 мг/100г. Такая вариабельность может свидетельствовать о влиянии микрорельефа на распределение агрохимических показателей почвы (что должно быть исследовано дополнительно).

Для подтверждения авторских выводов о влиянии качества обработки почвы на содержание радиоцезия в почвах блочных повышений опорных площадок было проведено

сравнение авторских данных агрохимического и гамма-спектрометрического анализа проб почвы с данными Центра «Орловский». Несмотря на то, что оценка радиологического и агрохимического состояния рассматриваемых полей Центром проводилась по выделам площадью 10 га, выводы наши совпали (табл. 2).

*Табл. 2. Агрохимические показатели почвы полей № 1, 2, 3
(культура — пшеница озимая, почва — серая лесная тяжёлосуглинистая)
(по данным Центра «Орловский»¹)
Table 2. Agrochemical indicators of soil in fields No 1, 2, 3
(crop — winter wheat, soil — gray forest heavy loam)
(according to the Orlovsky Center²)*

Агрохимический показатель	Поле № 1	Поле № 2	Поле № 3
гумус	5,4	3,5	4
P ₂ O ₅	13,6	8,9	8,8
K ₂ O	8,2	9,8	13,7
pH	5,4	4,9	4,9
Опорное значение удельной активности цезия-137, установленное для блочных повышений, Бк/кг	130,5	180	174,7

По данным Центра, почвы поля № 1 характеризуются большим содержанием гумуса, подвижного фосфора, самым низким уровнем кислотности. Следовательно, вынос радиоцезия с урожаем на поле № 1, вероятнее всего, был выше, чем на двух других полях. Следует отметить, что в настоящее время на сети мониторинга Центров химизации и сельскохозяйственной радиологии не учитывается влияние микрорельефа на радиологические и агрохимические свойства почв. При сравнении, например, содержания P₂O₅ на поле № 3 по данным Центра (8,8 мг/100г) и по данным авторов статьи (5,9–12,5 мг/100 г), можно заключить, что вариабельность P₂O₅, обнаруженная авторами [Трофимец, 2018], свидетельствует о необходимости изучения влияния микрорельефа палеокриогенного происхождения на показатели продуктивности почвы.

В том случае, если удастся выяснить, каков был уровень радиоактивного загрязнения почв поля № 1 в 1986 г., появится возможность установить, не попало ли это поле в зону локального минимума радиоактивных выпадений. В настоящей статье эта проблема не рассматривается.

ВЫВОДЫ

Проведённое исследование показало, что опорное значение радиоцезия целесообразно определять для конкретных полей, если последние различаются по экспозиции и по характеру обработки почвы. Установлено, что на поле северной экспозиции с зерновым севооборотом, на которое регулярно вносились удобрения, которое отличалось повышенным содержанием гумуса, подвижного фосфора, низкой кислотностью почвы, высокой урожайностью, обуславливающей большой вынос радиоцезия с урожаем, опорное значение

¹ Материалы агрохимического обследования земель ФКП «Орловская Биофабрика». ФГБУ Центр химизации и сельскохозяйственной радиологии «Орловский», 2015. 25 с.

² Materials of the agrochemical inspection of the land of the Federal State Enterprise “Orel Biofactory”. FSBI Center for Chemicalization and Agricultural Radiology “Orlovsky”, 2015. 25 p. (in Russian)

радиоцезия существенно ниже (более чем на 20 %) опорного значения радиоцезия на соседних полях с менее плодородной почвой.

Опорные площадки при применении радиоцезиевого метода следует назначать с учётом экспозиции склоновой поверхности и характера обработки почвы. Устанавливать опорное значение на территориях, расположенных в перигляциальной зоне бассейна верхней Оки следует на блочных повышениях. Размеры площадок будут определяться размерами блоков. Площади участков для выбора опорных площадок в условиях размеров блочных повышений от 10 м до 20 м и более (при принятии 8–10 точек послойного пробоотбора) составляют около 0,04 км².

Вариабельность удельной активности цезия-137, обусловленная чередованием межложбинных водоразделов (в приводораздельной зоне) или блочных повышений (на водораздельной поверхности) и тальвегов микроложбин, указывает на то, что изучение влияния микрорельефа палеокриогенного происхождения на распределение показателей продуктивности почв и её радиоактивное загрязнение является своевременным и актуальным. Учёт полигонально-блочного строения водораздельных поверхностей при установлении опорного значения цезия-137 позволит снизить погрешность оценки потерь почвы радиоцезиевым методом до 20 % и более.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество».

ACKNOWLEDGEMENTS

The research is funded by Russian Geographical Society.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алифанов В.М., Гугалинская Л.А., Овчинников А.Ю. Палеокриогенез и разнообразие почв центра Восточно-Европейской равнины. М.: ГЕОС, 2010. 160 с.
2. Величко А.А., Морозова Т.Д., Нечаев В.Б., Порожнякова О.М. Палеокриогенез, почвенный покров и земледелие: Монография. М.: Наука, 1996. 150 с.
3. Голосов В.Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы в верхних звеньях флювиальной сети освоенных равнин умеренного пояса. Автореферат дисс. на соискан. уч. степ. докт. геогр. наук. М., 2003, 45 с.
4. Долгополова Н.Н. Физическая и агрохимическая характеристика почв в условиях Центрально-чернозёмного государственного заповедника. Труды ЦЧГЗ, 1948. Вып. 2. С. 14–19.
5. Жукова О.М. Динамика эрозионно-аккумулятивных процессов центра Русской равнины на основе применения радиоизотопных методов. Диссертация канд. геогр. наук. Москва, 2010. 175 с.
6. Маркелов М.В. Современные эрозионно-аккумулятивные процессы в верхних звеньях гидрографической сети лесной и лесостепной зон. Автореферат канд. дисс. Москва, 2004. 26 с.
7. Трофимец Л.Н., Паниди Е.А. Особенности применения радиоцезиевого метода при изучении эрозионных процессов на антропогенно преобразованных склонах, осложнённых ложбинным микрорельефом. Теория и методы современной геоморфологии: Материалы XXXV Пленума Геоморфологической комиссии РАН, Симферополь, 3–8 октября 2016 г. Т. I. С. 365–369.
8. Трофимец Л.Н., Паниди Е.А., Кочуров Б.И., Иванеха Т.Л., Петелько А.И. Оценка возможностей цезия-137 чернобыльского происхождения идентифицировать потери почвой питательных веществ (подвижного фосфора) вследствие эрозии. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы междунар.

конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. Т. 24. Ч. 1. С.450–461. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-110-120.

9. Фридланд В.М. Структура почвенного покрова. М.: Мысль, 1976. 423 с.

10. Walling D.E., He Q. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. *J. Environ. Qual.*, 1999. V. 28. No 2. P. 611–622.

REFERENCES

1. Alifanov V.M., Gugalinskaya L.A., Ovchinnikov A.Yu. Paleocryogenesis and soil diversity in the center of the East European Plain. Moscow: GEOS, 2010. 160 p. (in Russian).

2. Dolgoplova N.N. Physical and agrochemical characteristics of soils in the conditions of the Central Black Earth State Reserve. *Proceedings of CBESR*, 1948. V. 2. P. 14–19 (in Russian).

3. Friedland V.M. The structure of the soil cover. Moscow: Mysl', 1976. 423 p. (in Russian).

4. Golosov V.N. Erosion-accumulative processes in the upper links of the fluvial network of developed plains of the temperate zone. Author's abstract, Doctor of Geography. Moscow, 2003. 45 p. (in Russian).

5. Markelov M.V. Modern erosion-accumulative processes in the upper links of the hydrographic network of forest and forest-steppe zones. Author's abstract, candidate dissertation. Moscow, 2004. 26 p. (in Russian).

6. Trofimets L.N., Panidi E.A. Features of the use of the radiocaesium method in the study of erosion processes on anthropogenically transformed slopes complicated by a hollow microrelief. *Theory and Methods of Modern Geomorphology: Proceedings of the XXXV Plenum of the Geomorphological Commission of the Russian Academy of Sciences, Simferopol, October 3–8, 2016.* V. I. P. 365–369 (in Russian).

7. Trofimets L.N., Panidi E.A., Kochurov B.I., Ivaneha T.L., Petelko A.I. Evaluation of the potential of cesium-137 of Chernobyl origin to identify soil loss of nutrients (labile phosphorus) due to erosion. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference.* Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2018. V. 24. Part 1. P. 450–461. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-110-120 (in Russian).

8. Velichko A.A., Morozova T.D., Nechaev V.B., Porozhnyakova O.M. Paleocryogenesis, soil cover and agriculture: Monograph. Moscow: Nauka, 1996. 150 p. (in Russian).

9. Walling D.E., He Q. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. *J. Environ. Qual.*, 1999. V. 28. No 2. P. 611–622.

10. Zhukova O.M. The dynamics of erosion-accumulation processes in the center of the Russian Plain based on the use of radioisotope methods. Candidate dissertation on geographical sciences. Moscow, 2010. 175 p. (in Russian).