

Л.Н. Трофимец¹, Е.А. Паниди², Н.Н. Чаадаева³, Е.А. Санкова⁴, Т.Л. Иванеха⁵,
 А.П. Тяпкина⁶, А.М. Сараева⁷, А.П. Александрова⁸, А.О. Баркалов⁹,
 В.И. Степанова¹⁰, А.А. Лаврусевич¹¹

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОЦЕЗИЕВОГО МЕТОДА И МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА К РАСЧЕТУ ИНТЕНСИВНОСТИ СМЫВА ПОЧВЫ НА РАСПАХИВАЕМЫХ СКЛОНАХ В БАССЕЙНЕ РЕКИ СУХАЯ ОРЛИЦА

АННОТАЦИЯ

В статье излагается разработанная на основе авторских данных методика оценки пространственного распределения потерь почвы на распахиваемых склонах экспериментального участка. Участок расположен в бассейне реки Сухая Орлица Орловского района Орловской области. Внедрение в практику землепользования принципов прецизионного земледелия требует точечной оценки потерь почвы, что возможно при использовании морфометрических показателей рельефа. Методы геоморфометрии в сочетании с ГИС и радиоцезиевым методом сделали возможным разработку методики расчета удельной активности цезия-137 (как индикатора смыва почвы) по морфометрическим показателям рельефа. В статье приводятся зависимости, разработанные для ложбин с площадью водосбора $\leq 23000 \text{ м}^2$ и $\leq 50000 \text{ м}^2$. Разработка метода расчета смыва почвы в элементах ложбинного комплекса на распахиваемом склоне осуществлялась в два этапа. На первом (полевом) этапе в тальвегах ложбин разного размера отбирались пробы почвы в пахотном слое. Точки отбора проб фиксировались в процессе GPS – съемки. Гамма-спектрометрический анализ почвенных проб и нанесение их на

- 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: trofimetc_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. Молодежная, д.7, 302502, Орловский район, поселок 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 Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт иностранных языков, кафедра английской филологии, ул. Комсомольская, д. 95, 302026, Орёл, Россия, *e-mail: amsaraeva-osu@yandex.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: 7oup@mail.ru*
- ¹⁰ ФГБУН Институт биологического приборостроения с опытным производством РАН, ул. Институтская, д. 7, г. Пушкино Московской обл., Россия, *e-mail: agroecology@inbox.ru*
- ¹¹ Московский государственный строительный университет, кафедра инженерных изысканий и геоэкологии, Ярославское шоссе, д. 26, 129337, Москва, Россия, *e-mail: lavrusevich@yandex.ru*

цифровую модель рельефа (DEM) позволили получить пространственно распределенную модель удельной активности цезия-137 чернобыльского происхождения масштаба 1:10000. Для распознавания ложбин использовались космические снимки сверхвысокого разрешения, опубликованные в Google Earth. На основе DEM, с использованием инструментов SAGA GIS, были построены поля площади сбора (рассчитанной по алгоритму DEMON) и профильной кривизны рельефа. Основу методики составила система зависимостей удельной активности цезия-137 от площади сбора и знака профильной кривизны. Удельную активность цезия-137 для межложбинных пространств рассчитывали по уравнениям, разработанным для ложбин с площадью сбора до 23000 м². Для расчета потерь почвы опорное значение цезия-137 предложено устанавливать индивидуально для каждого из трех изучаемых полей, что обусловлено наличием тренда чернобыльских выпадений. В условиях полигонально-блочного микрорельефа палеокриогенного происхождения (который распространен на анализируемой территории) опорное значение удельной активности цезия-137 авторы рекомендуют определять в пределах блочных повышений на водораздельной поверхности распахиваемых склонов. Тренд устанавливался по результатам анализа послойного распределения цезия-137 по глубине в тальвегах ложбин и в балке, «принимающих» наносы с изучаемых полей. По результатам расчетов была построена карта интенсивности смыва почвы за период с 1986 по 2016 год для экспериментального участка.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полигонально-блочный микрорельеф, удельная активность цезия-137, опорные площадки, площадь сбора, смыв почвы.

Lyubov N. Trofimetz¹, Evgeny Panidi², Natalia N. Chaadaeva³, Elena A. Sankova⁴, Taras L. Ivaneha⁵, Angela P. Tyapkina⁶, Anna M. Saraeva⁷, Angelica P. Alexandrova⁸, Aleksandr O. Barkalov⁹, Vera I. Stepanova¹⁰, Andrey A. Lavrushevich¹¹

APPLICATION OF THE RADIOCESIUM METHOD AND MORPHOMETRIC RELIEF INDICATORS TO THE CALCULATION OF SOIL LOSS INTENSITY ON PLOWED SLOPES IN THE SUKHAYA ORLITSA RIVER BASIN

-
- ¹ Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, Department of Geography, Ecology and General Biology, 95 Komsomolskaya st., 302026, Orel, *e-mail: trofimetc_1_n@mail.ru*
- ² Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, 10th line VO, 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, 95 Komsomolskaya st., 302026, Orel, *e-mail: n_chaadaeva@list.ru*
- ⁴ Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, Department of Geography, Ecology and General Biology, 95 Komsomolskaya st., 302026, Orel, *e-mail: alena7orel@yandex.ru*
- ⁵ Center for chemicalization and agricultural radiology “Orlovsky”, 7 Molodezhnaya st., 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, 95 Komsomolskaya st., 302026, Orel, *e-mail: angelikpt@mail.ru*
- ⁷ Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, Department of Geography, Ecology and General Biology, 95 Komsomolskaya st., 302026, Orel, *e-mail: amsaraeva-osu@yandex.ru*
- ⁸ Orel State University, Institute of Foreign Languages, Department of English Philology, 95 Komsomolskaya st., 302026, Orel, *e-mail: angelica.p.alexandrova@yandex.ru*
- ⁹ Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, Department of Geography, Ecology and General Biology, 95 Komsomolskaya st., 302026, Orel, *e-mail: 7oup@mail.ru*
- ¹⁰ Institute for biological instrumentation of RAS, 7 Institutskaya str., Pushchino, Moscow region, Russia, *e-mail: agroecology@inbox.ru*
- ¹¹ Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe shosse, 26, 129337, Moscow, Russia, *e-mail: lavrushevich@yandex.ru*

ABSTRACT

Based on the authors' data, the paper describes a methodology for assessing the spatial distribution of soil losses on the plowed slopes of the experimental site. The site is located in the basin of the Sukhaya Orlitsa River in the Orel District, Orel Region. The introduction of the principles of precision farming into land use practice requires a point estimate of soil losses, which is possible when using morphometric relief indicators. Geomorphometry methods in combination with GIS and the radiocaesium method made it possible to develop a method for calculating the specific activity of cesium-137 (as an indicator of soil losses) based on the morphometric parameters of the relief. The article presents the dependencies developed for depressions with a catchment area of $\leq 23000 \text{ m}^2$ and $\leq 50,000 \text{ m}^2$. The development of a method for calculating soil losses in the elements of a depression complex on a plowed slope was carried out in two stages. At the first (field) stage, soil samples in the arable layer were taken in thalweg of depressions of different sizes. Sampling points were recorded during GPS survey. Gamma-spectrometric analysis of soil samples and their application to a digital elevation model (DEM) allowed to obtain a spatially distributed model of the specific activity of cesium-137 of Chernobyl origin on a scale of 1:10000. To recognize the depressions, ultra-high resolution satellite images published in Google Earth were used. On the basis of the DEM, using the SAGA GIS tools, the authors built the fields of the collection area (calculated by the DEMON algorithm) and the profile curvature of the relief. The method was based on a system of dependences of the specific activity of cesium-137 on the collection area and the sign of the profile curvature. The specific activity of cesium-137 for inter-depression spaces was calculated using the equations developed for depressions with a collection area of up to $23,000 \text{ m}^2$. To calculate soil losses, it was proposed to establish the reference value of cesium-137 individually for each of the three studied fields, which is due to the presence of the trend of Chernobyl fallout. In conditions of a polygonal block microrelief of paleocryogenic origin (which is widespread in the analyzed territory), the authors recommended determining the reference value of the specific activity of cesium-137 within block increases on the watershed surface of the plowed slopes. The trend was established on the results of the analysis of the layer-by-layer distribution of cesium-137 in depth in the thalweg of the depressions and in the balka, "receiving" overburdens from the fields under the study. Taking into account the results of the calculations, a map of the intensity of soil losses was constructed for the experimental site as of from 1986 to 2016.

KEYWORDS: polygonal and block microrelief, specific activity of cesium-137, experimental sites, collection area, soil losses.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях изменяющихся условий увлажнения и меняющихся систем землепользования оценивать потери почвы вследствие эрозии на распахиваемых склонах за конкретный временной интервал часто становится принципиально важным для оценки степени пригодности систем землепользования, существующих на данный момент. В условиях отсутствия наблюдений за формированием потерь почвы радиоцезиевый метод может помочь восполнить этот пробел. Применение ГИС к анализу пространственных особенностей распределения потерь почвы на распахиваемых полях дает возможность по рельефу давать оценку потерям почвы в конкретных точках сельскохозяйственного поля.

Цель исследования – создание методики расчета (с использованием радиоцезиевого метода и количественных характеристик рельефа) интенсивности протекания эрозионных процессов на распахиваемых склонах, осложненных полигонально-блочными формами рельефа на водораздельных поверхностях и ложбинными формами – на склонах, и построение карты потерь почвы за послечернобыльский период.

Основные задачи исследования: 1 – изучить возможности учета полигонально-блочного микрорельефа в схеме расчета потерь почвы радиоцезиевым методом (при оценке опорного значения цезия-137); 2 – установить тренд чернобыльских выпадений с тем, чтобы выработать рекомендации по назначению опорных площадок для изучаемых полей; 3 – разработать систему расчетных зависимостей удельной активности цезия-137 чернобыльского происхождения (как индикатора потерь почвы в древних ложбинах и в современных ручьях природно-антропогенного происхождения) от морфометрических показателей рельефа и апробировать ее для экспериментального участка; 4 – построить карту интенсивности смыва почвы для экспериментального участка.

В статье приводится пошаговое изложение методики расчета интенсивности смыва почвы по морфометрическим показателям рельефа. Методика разработана для экспериментального участка распаханного склона в бассейне реки Сухой Орлицы Орловского района Орловской области с применением полевых методов, радиоцезиевого метода, дистанционных методов, морфометрического анализа рельефа, ГИС методов.

Алгоритм методики разрабатывался поэтапно. На первом этапе отбирались интегральные пробы почвы в тальвегах микроложбин, и осуществлялся их гамма-спектрометрический анализ. Тальвеги выбирались по той простой причине, что они хорошо различимы визуально и на местности и на топографической карте и потому удобны для назначения точек пробоотбора почвы. Кроме этого, тальвеги ложбин идентифицируют участки с максимальными значениями площади сбора (потенциальной площади, с которой в данную точку могут собираться талые и дождевые воды, а потому наблюдаются наибольшие потери почвы вследствие смыва). Именно для точек, расположенных в области тальвегов ложбин наиболее целесообразно искать статистические связи с величиной площади сбора. Этот морфометрический показатель наилучшим образом описывает первый механизм аккумуляции [Шарый, 2005]. Чем больше площадь сбора, тем больше энергия потока в тальвеге ложбины, тем больше потери почвы, тем меньше удельная активность цезия-137 в смытой в разной степени почве тальвега. На этом этапе была создана цифровая модель рельефа (DEM), построенная на основе топографических данных масштаба 1:10000. Были построены карты площади сбора и карты профильной кривизны рельефа. Площадь сбора рассчитывалась по алгоритму DEMON [Costa-Cabral, Burges, 1994]. Профильная кривизна рассчитывалась по формуле Эванса [Evans, 1972]. На следующем этапе были построены зависимости удельной активности цезия-137 (измеренного в тальвегах микроложбин) от площади сбора и знака профильной кривизны.

Зависимости носят обратный характер. Уменьшение энергии потока наблюдается в зонах аккумуляции (в вогнутых участках тальвегов), которые описываются отрицательными значениями профильной кривизны (описывающей второй механизм аккумуляции [Шарый, 2005]). Эти два морфометрических показателя в работе приняты в качестве основных. Третий параметр – экспозиция. На склоне южной экспозиции интенсивность смыва почвы больше (более интенсивно проходит таяние снега), северная экспозиция отличается медленно протекающими процессами эрозии. Были разработаны три расчетных зависимости: две зависимости – для ложбин с площадью водосбора не более 23 000 м². Одна из них разработана для ложбин, расположенных на склоне южной экспозиции. Другая – на северном склоне. Для самой большой ложбины на склоне южной экспозиции с площадью водосбора не менее 50 000 м² была разработана своя, третья, зависимость. Каждая из зависимостей представлена двумя уравнениями. Одно уравнение описывает зависимость удельной активности цезия-137 от площади сбора для выпуклых участков ложбин (для положительных значений профильной кривизны), другое – для зон аккумуляции с отрицательными значениями профильной кривизны (табл. 1).

Для того чтобы от удельной активности цезия-137, рассчитываемой по разработанным уравнениям, перейти к смыву почвы, необходимо знать опорное значение цезия-137 для каждого из полей. Поэтому на втором этапе выбиралась опорная площадка. Опорная площадка выбиралась с учетом полигонально-блочного строения водораздельной поверхности водосбора реки, расположенного в перигляциальной области Русской равнины [Алифанов и др., 2010, Бердников, 1976, Величко, 1996, Трофимец и др., 2020]. Авторы предлагают определять опорное значение цезия-137 в пределах блочных повышений водораздельных поверхностей для каждого из анализируемых полей. Для установления опорного значения в восьми точках на водораздельной поверхности производился отбор проб почвы послойно по глубине через 2 см. Анализ диаграмм распределения активности цезия-137 по глубине позволил отобрать только те точки, которые расположены в пределах блочных повышений (их в поле сложно распознать визуально) с минимальным смывом почвы. Это те точки, в пределах которых отмечается наименьший смыв почвы. Вид диаграммы для этих точек имеет свои особенности [Шамигурина и др., 2016, Трофимец и др., 2020]. Максимум радиоцезия, как правило, отмечается в области плужной подошвы. И, что замечено авторами статьи, глубже плужной подошвы (т.е. глубже 20–25 см, что соответствует пахотному слою) в точках, не попавших в свально-развальные борозды, не отмечаются локальные пики активности цезия-137. Эти пики, по мнению авторов статьи, обусловлены тем, что, возможно, шурф пересек ходы землероев, делающих свои захоронения с зерновыми остатками, загрязненными радиоцезием. Визуально в поле было замечено, что норки грызунов встречаются именно вдоль тальвегов свально-развальных борозд. Вероятно, именно в тальвегах свально-развальных борозд, вдоль которых остаются неубранные пожнивные остатки, грызуны на некоторой глубине делают свои «захоронки» [Трофимец и др., 2020].

На следующем этапе необходимо обосновать целесообразность назначения опорной площадки для каждого из полей. Обоснование назначения опорных площадок для каждого из полей делается по результатам анализа тренда чернобыльских выпадений [Маркелов, 2004]. Тренд чернобыльских выпадений авторы рекомендуют устанавливать на основании анализа величины максимума чернобыльских выпадений 1986 года и особенностей его пространственного распределения. Величина чернобыльских выпадений 1986 года устанавливалась авторами по результатам послойного отбора проб почвы и гамма-спектрорметрического анализа образцов почвы в ложбинах и балке, принимающих наносы, поступающие с анализируемых полей. В каждой точке выкапывался шурф глубиной до 80 см. С площади 10*10 см отбирались послойно пробы почвы через 2 см по глубине. В результате анализа авторы установили, что тренд выпадений действительно имеет место на изучаемой территории. Обнаружено, что величина удельной активности цезия-137 растет по мере движения от поля, расположенного западнее, к полю, расположенному северо-восточнее. Направление тренда соответствует движению чернобыльского облака. В 1986 году продвижение чернобыльского облака к северу сопровождалось радиоактивными выпадениями, отличающимися количеством радионуклида, поступившего в почву каждого из полей. Этот вывод послужил основанием для назначения опорных площадок для каждого из изучаемых полей.

На третьем этапе была построена карта пространственного распределения интенсивности смыва почвы за период, прошедший с 1986 года по 2016 год. В статье приводится карта смыва почвы для склона южной экспозиции, построенная по изложенной методике.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу разработанной методики положены авторские полевые данные, полученные за период 2012–2020 гг. на экспериментальном участке сельскохозяйственных полей в бассейне реки Сухая Орлица Орловского района Орловской области (рис. 1). Отбор проб почвы на полях № 2 и 3 проводился вдоль тальвегов ложбин. Ложбины хорошо «читаются» на топографической карте и карте площади сбора (рис. 4). На склоне северной экспозиции отбор проб почвы производился вдоль ложбины № 2.1, на склоне южной экспозиции – вдоль ложбин № 3.1. и 3.2. Площади водосбора ложбин 2.1 и 3.1 равны 23000 м². Площадь водосбора ложбины 3.2. равна 50000 м². В дальнейшем авторы будут пользоваться терминологией, принятой авторами метода DEMON и называть морфометрический параметр, описывающий величину потенциальной площади, с которой в каждую точку поверхности может собираться вода (или почвенный материал), площадь сбора. Координаты точек отбора проб почвы устанавливались в процессе GPS – съемки.

Все пробы почвы подвергались гамма-спектрометрическому анализу. Гамма-спектрометрический анализ проводился по стандартным методикам в Центре химизации и сельскохозяйственной радиологии «Орловский» [Методика, 1996]. Всего в анализах участвовало более 200 проб почвы. Они составили основу радиоцезиевого метода определения потерь почвы вследствие смыва (эрозии). Определение смыва почвы этим методом основывается на допущении, что при перепахивании после чернобыльских выпадений цезия-137 был перемешан в пахотном слое мощностью 20–25 см. За период, прошедший после аварии, часть пахотного слоя смылась. При смыве верхнего слоя почвы радиоактивность оставшегося пахотного слоя снизилась вследствие «разбавления» радиоактивной почвы почвой из «чистого» от радиоцезия подпахотного горизонта. Радиоцезиевый метод позволяет точно изучать процессы смыва и аккумуляции на склоновых поверхностях. Сегодня он получает все большее распространение [Walling, He, 1999; Маркелов, 2004; Шамигурина и др., 2016 и др.], несмотря на погрешности, обусловленные несовершенством средств измерения удельной активности почвы. Предел обнаружения ¹³⁷Cs в почве - 3 Бк/пробу; погрешность определения – 10–20%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Суть радиоцезиевого метода оценки потерь почвы в точке сводится к сопоставлению измеренного в точке запаса цезия-137 в почве с запасом радиоцезия на опорной площадке. На опорных площадках полей № 1 и № 3 (рис. 2) было выкопано 8 шурфов глубиной до 80 см. На опорной площадке поля №2 образцы отбирались интегральные из пахотного слоя 0–25 см.

Поскольку в поле установить, попала ли точка пробоотбора на блочное повышение или в межблочное понижение сложно, то окончательное заключение по принятию точки к расчету опорного значения на соответствующей площадке, принималось после анализа диаграмм распределения цезия-137 по глубине в каждой из восьми точек [Трофимец и др., 2020]. Анализ проводился для каждого из полей. Отсеивались точки с «коротким» профилем (на диаграмме распределения цезия-137 по глубине). В выборку включались точки с наименее «укороченным» профилем, что подтверждало, что точка попала на блочное повышение (в зону несмытых или слабосмытых почв). Блочные повышения на изучаемых полях имеют размеры 10–20 м [Трофимец и др., 2020]. Следует заметить, что из анализа исключались также точки, попавшие в тальвеги свально-развальных борозд. На рис. 2 видно, что, например, точки №149172, 149173, 149175, 149176 попали в тальвеги свально-развальных борозд. Они были исключены из анализа.

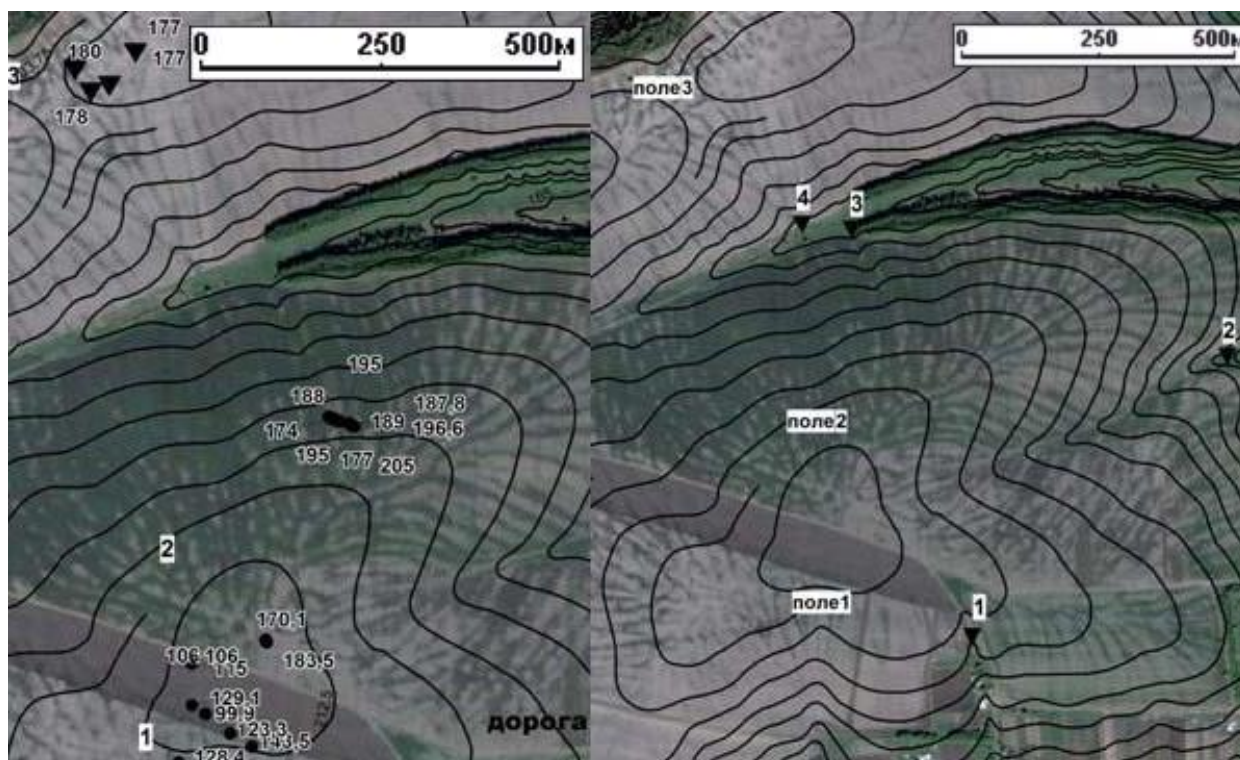


Рис. 1. Слева - фрагмент космического снимка (снимок 16 мая 2003 г.) полей № 1,2,3. Поля №1 и №2 разделяет проселочная дорога. Пунсоны – удельная активность цезия-137 в пределах участков, выбранных для назначения опорных площадок. Справа – на космическом снимке точки у пунсонов-треугольников обозначают местоположение точек послойного пробоотбора по глубине в днищах ложбин и балки. С поля №1 поступают наносы к точке № 1. С поля № 2 – к точкам № 2 и № 3. С поля № 3 – к точке №4. Масштаб 1:10 000

Fig. 1. On the left – a fragment of a satellite image (image on May 16, 2003) of fields no. 1,2,3. Fields 1 and 2 are separated by a country road. Markers are specific activity of cesium-137 within the areas selected for the designation of experimental sites. On the right – on the satellite image, the points at the markers-triangles indicate the location of the points of layer-by-layer sampling in depth in the bottoms of depressions and balka. From field No 1, overburdens come to point No 1. From field No 2 – to points No. 2 and No 3. From field No 3 – to point No 4. Scale 1:10,000

На рисунке 1 видно, что измеренные на опорных площадках значения радиоцезия отличаются вариабельностью (на рисунке приведены значения радиоцезия как принятые к расчету опорного значения, так и не принятые, чтобы показать степень вариабельности этих значений). Из рис. 2 видно, что вариабельность обусловлена попаданием точек в тальвеги свально-развальных борозд, в межблочные понижения или на блоки. Обнаружение элементов полигонально-блочного, ложбинного микрорельефа и свально-развальных борозд осуществлялось с использованием открытых данных дистанционного зондирования Земли (снимки, доступные в Google Earth™). Дополнительно использовались также снимки WorldView разрешением 0,5 м/пикс., предоставленные DigitalGlobe Foundation. В результате анализа послойного распределения радиоцезия по глубине были выбраны точки для расчета опорного значения.

На рис. 3 приведены некоторые диаграммы как принятые к расчету опорного значения цезия-137 для поля № 3, так и исключенные из числа опорных. Точка 149175 попала в тальвег свально-развальной борозды. Она не была принята к расчету опорного значения, несмотря на то, что профиль на диаграмме не укорочен (то есть почва может быть отнесена к категории несмытой). Но, как видно на рис. 2, эта точка попала в тальвег свально-развальной борозды. В качестве косвенного подтверждения этому можно привести следующие аргументы. Авторы считают, что локальные пики цезия-137 на глубине 26–28 см (24 Бк/кг), 36–38 см (16,2 Бк/кг), 48–50 см (23,7 Бк/кг) – это результат попадания в места со следами деятельности животных (или локальные участки «схоронок» пожнивных остатков, вынесенных с поверхности поля и потому загрязненных радиоцезием, или участки ходов, загрязненных пожнивными остатками). Поскольку именно в тальвегах свально-развальных борозд концентрируются пожнивные остатки, то обнаружение подобных локальных пиков ниже плужной подошвы могут служить основанием для отнесения точки к тальвегу свально-развальной борозды. В точке 149174 максимальное значение активности цезия-137 (192,3 Бк/кг; 211,3 Бк/кг) приурочено к плужной подошве (на глубине, соответственно, 20–22 см (22–24 см)). Смыв почвы минимален. Запас радиоцезия выше плужной подошвы – 35484 Бк/м². «Недоучтенный» запас (до глубины 30 см) составил всего 4%. Эта точка принята к оценке опорного значения радиоцезия [Трофимец и др., 2020]. Подобный анализ был проведен для всех восьми точек послыйного отбора проб почвы по глубине на поле №1. В результате были выбраны три точки (на рис. 2 это точки 154163, 149174, 149177). Опорное значение по этим точкам составило 174,7 Бк/кг.

На поле №2 опорное значение получено как среднее арифметическое из интегрально отобранных образцов почвы (оно принято равным 180 Бк/кг). На поле №3 опорное значение принято равным 130,5 Бк/кг [Трофимец и др., 2020].

Измерения удельной активности цезия-137 чернобыльского происхождения в интегральных образцах почвы, отобранных с глубины 0-25 см в тальвегах ложбин с площадью водосбора 23 000 м² и 50000 м², позволили авторам разработать серию расчетных уравнений зависимости активности цезия-137 от площади сбора (рассчитанной по методу DEMON) [Costa-Cabral, Burges, 1994] и знака профильной кривизны (рассчитана в ArcGIS). Использовалась формула профильной кривизны, предложенная [Evans, 1972]. Уравнения приведены в таблице 1. Уравнения №1 и 1.1 «работают» для ложбин на склоне южной экспозиции с площадью сбора не менее 50000 м². Уравнения № 2 и 2.1 разработаны для ложбин на склоне южной экспозиции с площадью сбора до 23 000 м² (допустимо его применение также для малых ложбин и межложбинных водоразделов на склоне южной экспозиции). Уравнения № 3 и 3.1 могут использоваться для ложбин с площадью сбора до 23000 м² на склоне северной экспозиции (допустимо его применение для малых ложбин и межложбинных водоразделов на склоне северной экспозиции).

Уравнения №1 и 1.1 разработаны по результатам отбора интегральных образцов почвы вдоль тальвега ложбины № L1 (рис.1 и 4). Уравнения №2 и 2.1 – по данным проб почвы, отобранных в тальвеге ложбины № L2. Уравнение № 3 и 3.1 – по данным ложбины № L3, расположенной на склоне северной экспозиции. По уравнению № 5 рассчитывалась интенсивность доставки наносов в ложбину и балку (в точки 1–4 на рис. 1 и 4). Для того, чтобы перейти в схеме расчета к определению потерь почвы (по уравнению № 4) в каждой точке пробоотбора (в каждой точке карты пространственного распределения потерь почвы вследствие эрозии) необходимо было дополнительно обосновать, следует ли использовать для каждого из анализируемых полей свою опорную площадку. Эти рекомендации можно было дать только после установления тренда чернобыльских выпадений.

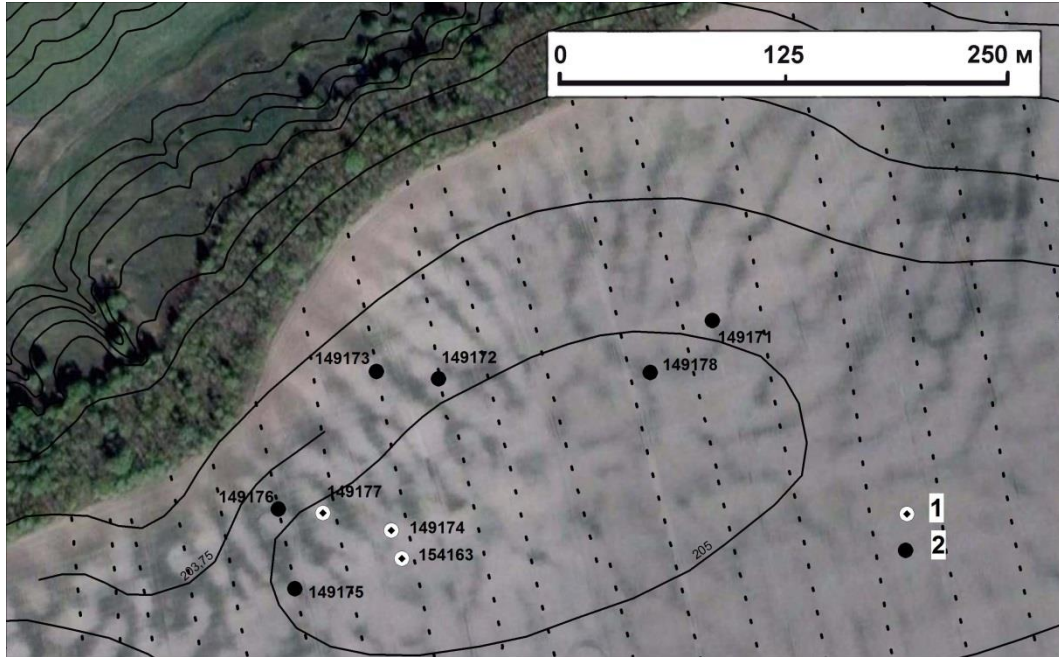


Рис. 2. Опорная площадка на поле №3. 1 – точки, выбранные для установления опорного значения активности цезия-137. 2 – точки послойного отбора проб почвы, не принятые к расчету опорного значения ввиду их «попадания» в тальвеги понижения или в свально-развальные борозды. Пунктирные линии помечают положение свально-развальных борозд. Космический снимок 16.05.2003г. доступен в Google Earth™

Fig. 2. Experimental site on field No. 3. 1 – points selected to establish the reference value of the activity of cesium-137. 2 - points of layer-by-layer sampling of soil, not accepted for the calculation of the reference value due to their “insertion” in the thalweg of the depression or in the crown and back furrows. The dotted lines mark the position of the crown and back furrows. Satellite image of 16.05.2003 is available on Google Earth™

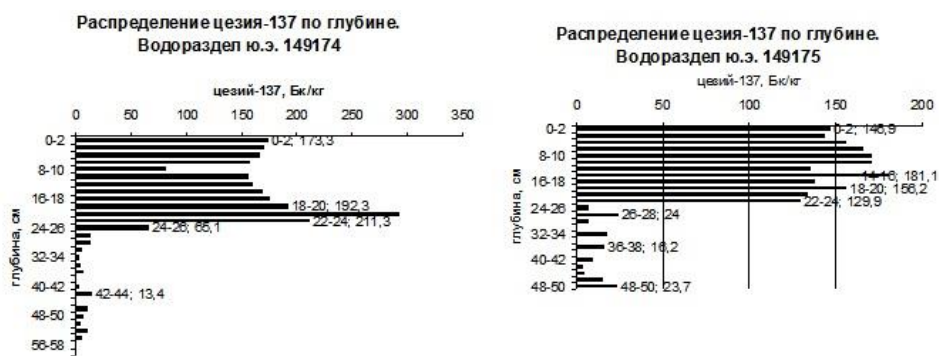


Рис. 3. Точка 149174 принята к расчету опорного значения цезия-137. Точка 149175 «попала» в тальвег свально-развальной борозды. Она не была принята к расчету опорного значения

Fig. 3. Point 149174 is accepted for the calculation of the reference value of cesium-137. Point 149175 “inserted” the thalweg of the crown and back furrow. It was not accepted for the calculation of the reference value

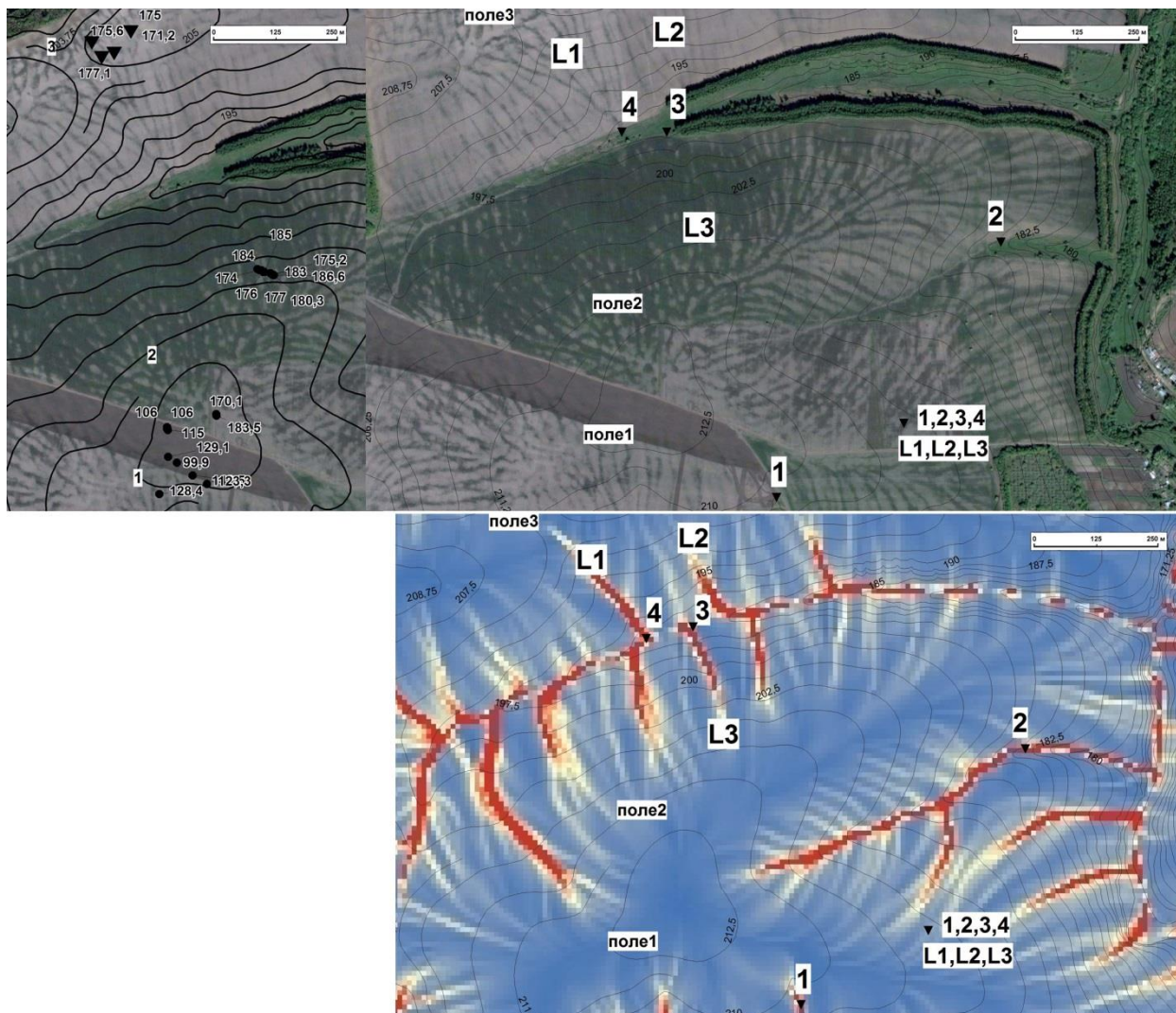


Рис. 4. Вверху — фрагмент космического снимка с полями № 1,2,3. В центре на космическом снимке пунсоны-треугольники (1, 2, 3, 4) обозначают местоположение точек полойного пробоотбора по глубине в днищах ложбин и балки, «принимающих» наносы с полей № 1, 2 и 3.); внизу — фрагмент карты площади сбора. L.1, L2, L.3 – ложбины, вдоль тальвегов которых отбирались интегральные пробы из пахотного горизонта. Масштаб 1:10 000

Fig. 4. Above — a fragment of a satellite image with fields No. 1,2,3. In the center of the satellite image, markers – triangles (1, 2, 3, 4) indicate the location of the points of layer-by-layer sampling in depth in the bottoms of depressions and balka that “receive” overburdens from fields No. 1, 2 and 3); below — a fragment of the collection area map. L.1, L2, L.3 are depressions, along the thalweg of which integral samples were taken from the arable horizon. Scale 1:10,000

Мы говорим чернобыльских потому, что по данным Центра химизации и сельскохозяйственной радиологии, до аварии на ЧАЭС максимальное значение измеренной активности цезия-137 в пахотном слое составляло не более 15 Бк/кг.

Активность цезия-137 в «дочернобыльские» годы в пахотном слое составляла менее 10% от измеренных современных значений удельной активности цезия-137. Иначе говоря, можно утверждать, что сегодня мы «работаем» с радиоцезием преимущественно чернобыльского происхождения.

Для установления тренда чернобыльских выпадений [Маркелов, 2004; Гусаров и др., 2018] в 2016–2020 гг. был произведен отбор проб почвы послойно в ложбинах (точки № 1 и 2) и в балке (точки № 3 и 4) (рис. 1 и 4). В каждой точке на соответствующей глубине был обнаружен максимум выпадений 1986 года. На рисунке 5 показаны диаграммы, построенные по результатам послойного отбора проб почвы по глубине во всех четырех точках. Очевидно, что точка №1 фиксировала наносы, поступившие с поля № 1. Точки № 2 и № 3 – с поля № 2. Точка № 4 – с поля № 3. В точке № 1 измерения производились в 2020 году. В точке № 2 – в 2018 году. В точке № 3 и 4 – в 2016 году. Приведение данных к 2020 году позволило скорректировать значение радиоцезия, датированного 1986 годом. На рисунке 6 приводится линия тренда, построенная по приведенным к 1986 году данным. Тренд показывает, что выпадения увеличивались по мере движения радиоактивного облака от поля № 1 к полю № 3. На склоне южной экспозиции (точка 4) выпало в 1986 году наибольшее количество радионуклида (673,8 Бк/кг). Это можно объяснить, вероятно, тем, что склон южной экспозиции был уже сух, поэтому отличался повышенной шероховатостью. При подъеме по склону шероховатость снижала скорость подъема облака, что привело к выпадениям большего количества радиоактивных частиц.

Табл. 1. Уравнения для расчета активности цезия-137
 Table 1. Equations for calculating the activity of cesium-137

№ уравнения	Уравнение	Условия применения уравнения			
		Площадь водосбора ложбины	экспозиция	Зона смыва (аккумуляции)	Знак профильной кривизны
1	$Y = -0,0004X + 146$	≤ 50000	южная	смыва	+
1.1	$Y = -0,0004X + 192,99$	≤ 50000	южная	аккумуляции	-
2	$Y = -0,0022X + 152,96$	≤ 23000	южная	смыва	+
2.1	$Y = -0,0021X + 184,15$	≤ 23000	южная	аккумуляции	-
3	$Y = -0,0011X + 176,6$	≤ 23000	северная	смыва	+
3.1	$Y = -0,0007X + 205,77$	≤ 23000	северная	аккумуляции	-

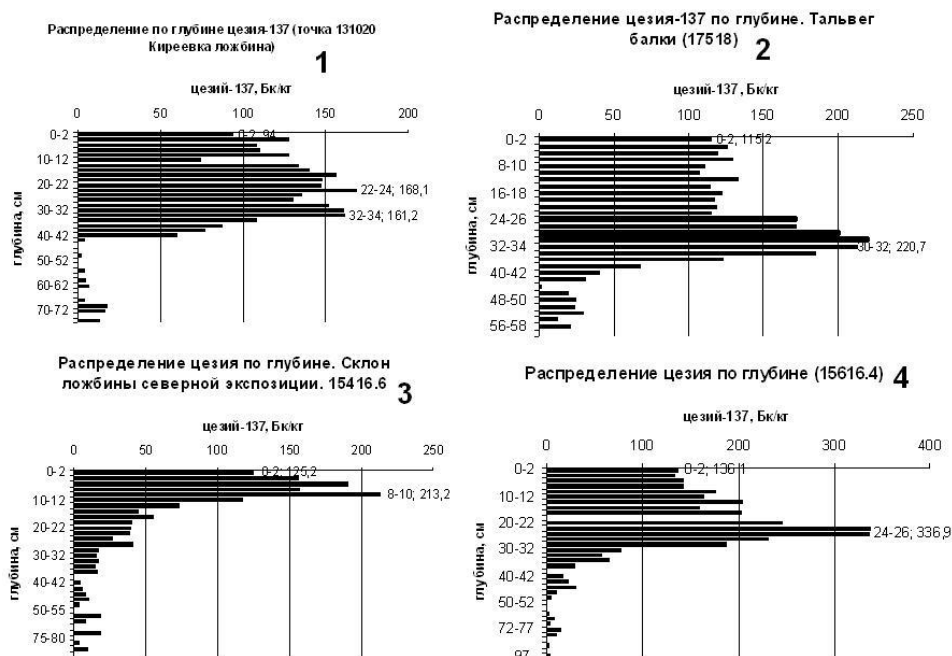
$$R \text{ т/га год} = 10 \times BZ_p / (t - t_0) \times (A - 1) \tag{4}$$

$$I_{акк} \text{ т/га год} = I_{акк}, \text{ м/год} * 10000 \text{ м}^2 * 1110 \text{ кг/ м}^3, \tag{5}$$

где: Y – удельная активность цезия-137 в точке пробоотбора, Бк/кг; X – площадь сбора, рассчитанная по методу DEMON, м^2 ; R – интенсивность смыва почвы, т/га год; B – плотность почвы (для серой лесной среднесуглинистой почвы $B = 1110 \text{ кг/м}^3$); Z_p – глубина отбора пробы почвы в пахотном слое (0,25 м); $(t - t_0)$ – число лет от года отбора пробы почвы до 1986 года (30 лет); A – отношение измеренной активности цезия-137 в точке к ее значению на опорной площадке (для склона южной экспозиции опорное значение цезия-137 принято равным 174,7 Бк/кг, для склона северной экспозиции – 180 Бк/кг [5]); $I_{акк}$ – интенсивность доставки наносов, т/га год, в ложбину и балку (в точки 1–4); 10000 – 1 га, выраженный в м^2 , 1110 – плотность серой лесной среднесуглинистой почвы, кг/м^3 .

Анализ тренда позволил сделать следующие заключения. На поле №1 у деревни Киреевка в 1986 году выпало наименьшее количество радионуклида. Максимум цезия-137 на глубине 22–24 см составил 368,7 Бк/кг. Вариабельность значений радионуклида на участке, выбранном под опорную площадку в 2019 году, составила 99,9–148,5 Бк/кг (это самые низкие значения цезия-137 из всех трех полей). Опорная площадка для этого поля должна назначать-

ся своя. На поле № 2 в 1986 году выпало в 1,16–1,25 раза больше цезия-137 чем на поле №1. Опорная площадка для поля №2 также должна назначаться своя. На поле № 3 в год Чернобыля выпало в 1,8 раза больше цезия-137 по сравнению с полем №1 (измеренный максимум активности цезия-137 на глубине 24-26см в 2016 году – 336,9 Бк/кг, в 1986 – 673,7 Бк/кг. Опорная площадка для поля №3 также должна назначаться своя.



. Рис. 5. Диаграммы распределения цезия-137 по глубине в принимающих наносы ложбинах и балках. 1, 2, 3, 4 – точки пробоотбора на рисунке 4

Fig. 5. Diagrams of the distribution of cesium-137 in depth in depressions and balkas that receive overburdens. 1, 2, 3, 4 are sampling points in Figure 4

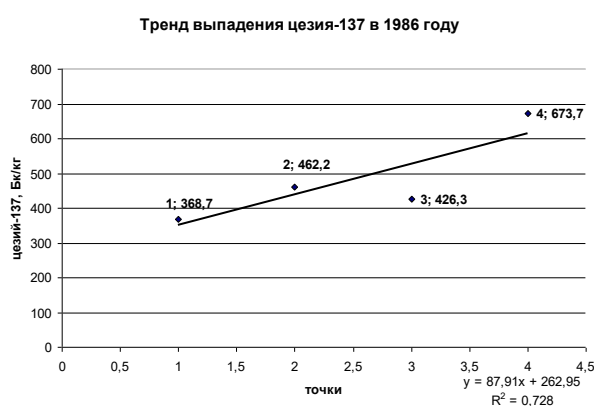


Рис. 6. Тренд чернобыльских выпадений. 368,7; 462,2; 426,3; 673,7 Бк/кг – максимумы активности цезия-137, обнаруженные на глубине в точках пробоотбора, соответственно, № 1, 2, 3, 4. Данные пересчитаны на 1986 год по Имшенник [Имшенник, 2011]

Fig. 6. The trend of the Chernobyl fallout. 368.7; 462.2; 426.3; 673.7 Bq / kg are the activity peaks of cesium-137, found at depth at sampling points, respectively, no. 1, 2, 3, 4. The data were recalculated for 1986 according to Imshennik [Imshennik, 2011]

На следующем этапе по значениям удельной активности цезия-137, рассчитанным для всех точек склоновой поверхности балки, была построена карта смыва почвы. На рисунке 7 приведен фрагмент карты интенсивности смыва почвы (в тонн/га год), рассчитанного по уравнениям 1, 1.1, 2, 2.2 и 4 для смежных ложбин с площадью водосбора до 50000 м² и до 23000 м² расположенных на склоне южной экспозиции.

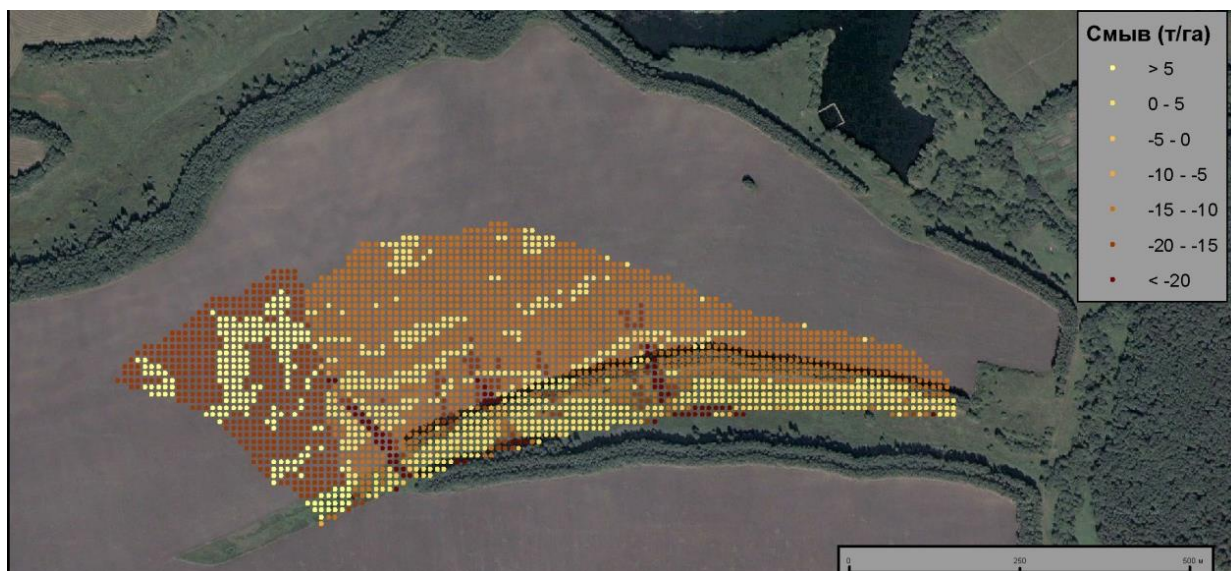


Рис. 7. Фрагмент карты смыва почвы (рассчитанного по уравнениям 1 – 2.1, 4), отрицательные значения — смыв, положительные — аккумуляция

Fig. 7. Soil losses map fragment (computations made according to equations 1 – 2.1, 4), negative values – soil flush, positive – soil accumulation

ВЫВОДЫ

Применение радиоцезиевого метода к картографированию потерь почвы вследствие эрозии в перигляциальных областях Русской равнины требует проведения поэтапного анализа для получения алгоритма расчета. Первый (полевой) этап требует отбора проб почвы в тальвегах ложбин. Второй этап требует обоснования назначения точек для установления опорного значения. В перигляциальных областях точки должны быть приурочены к блочным повышениям на водораздельных поверхностях (на участках наименьшего смыва почвы). Третий этап требует обоснования целесообразности установления опорных площадок для конкретных полей. На этом этапе тренд чернобыльских выпадений должен устанавливаться по данным максимальных выпадений 1986 года (определяется по «пикам» радиоцезия, расположенным на разной глубине в ложбинах и балках, «принимающих» наносы с анализируемых полей). Этап разработки расчетных уравнений включает использование морфометрических показателей рельефа (площадь сбора и профильная кривизна). Последний этап – построение карты распределения активности цезия-137, а по ней – карты потерь почвы вследствие эрозии - является завершающим этапом разработки методики оценки пространственного распределения потерь почвы вследствие эрозии на экспериментальном участке.

БЛАГОДАРНОСТИ

Публикация осуществлена при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество»

ACKNOWLEDGEMENTS

The publication was funded by the All-Russian public organization “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. *Бердников В.В.* Палеокриогенный микрорельеф центра Русской равнины. М.: Наука, 1976. 126 с.
3. *Величко А.А.* Палеокриогенез, почвенный покров и земледелие: монография А.А. Величко, Т.Д. Морозова, В.Б. Нечаев, О.М. Порожнякова. М.: Наука, 1996. 150 с.
4. *Гусаров А.В., Рысин И.И., Шарифуллин А.Г., Голосов В.Н.* Оценка современного тренда эрозионно-аккумулятивных процессов на малом распаханном водосборе с использованием цезия-137 в качестве хрономаркера (Юг Удмуртской Республики). Геоморфология. М.: Наука, 2018. № 2. С. 37–56.
5. *Маркелов М.В.* Современные эрозионно-аккумулятивные процессы в верхних звеньях гидрографической сети лесной и лесостепной зон: автореф. дис. ... канд. геогр. н. М.: Издательство Московского университета, 2004. 22 с.
6. Методика измерения активности радионуклидов в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-спектрометре с использованием программного обеспечения «Прогресс». ГП «ВНИИФТРИ». 1996. 41 с.
7. *Трофимец Л.Н., Паниди Е.А., Чаадаева Н.Н., Санкова Е.А., Иванеха Т.Л., Тяпкина А.П., Петелько А.И., Александрова А.П., Ладнова Г.Г.* Установление опорного значения удельной активности цезия-137 на распахиваемых склонах в перигляциальной области бассейна Верхней Оки: применение спутниковых снимков, ГИС и агрохимических показателей почвы ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2020. Т. 26. Ч. 3. С. 170–183. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-3-26-170-183.
8. *Трофимец Л.Н., Паниди Е.А., Чаадаева Н.Н., Тяпкина А.П., Санкова Е.А.* О запасе Цезия-137 в пахотном горизонте на водораздельной поверхности бассейна реки Сухой Орлицы при установлении опорного значения Цезия-137. VIII Шукинские чтения: рельеф и природопользование. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, Москва, 28 сентября-1 октября 2020 г. [Электронное издание]. М.: Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2020. С.531-536.
9. *Шамигурина Е.Н., Голосов В.Н., Иванов М.М.* Пространственно-временная реконструкция поля выпадения чернобыльского ¹³⁷Cs на почвенный покров в верховьях бассейна реки Локны. Радиационная биология. Радиоэкология. М.: Наука, 2016. Т. 56. С. 414–425.
10. *Шарый П.А.* Оценка взаимосвязей рельеф-почва-растения с использованием новых методов в геоморфометрии: автореф. дис. ... канд. биол. н. Тольятти, 2005. 25 с.
11. *Costa-Cabral M.C., Burges S.J.* Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. Water Resources Research. 1994. V. 30, issue 6. P. 1681–1692. DOI: 10.1029/93WR03512.
12. *Evans L.S.* General geomorfometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: Chorley R.J. (ed.) Spatial Analysis in Geomorfology, London, Methuen & Co. Ltd., 1972. P. 17–90.

13. *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. *Berdnikov V.V.* Paleocryogenic microrelief of the center of the Russian Plain. Moscow: Nauka, 1976, 126 p. (in Russian).
3. *Costa-Cabral M.C., Burges S.J.* Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research*. 1994. V. 30, issue 6. P. 1681–1692. DOI: 10.1029/93WR03512.
4. *Evans L.S.* General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: Chorley R.J. (ed.) *Spatial Analysis in Geomorphology*, London, Methuen & Co. Ltd., 1972. P. 17–90.
5. *Gusarov A.V., Rysin I.I., Sharifullin A.G., Golosov V.N.* Assessment of the current trend of erosion-accumulative processes in a small plowed catchment area using cesium-137 as a chronomarker (south of the Udmurt Republic). *Geomorphology*. Moscow: Nauka, 2018. No 2. P. 37–56 (in Russian).
6. *Markelov M.V.* Modern erosion-accumulative processes in the upper links of the hydrographic network of the forest and forest-steppe zones. PhD dissertation (author's abstract). M: Moscow University Press, 2004. 22 p. (in Russian).
7. Methods for measuring the activity of radionuclides in counting samples on a scintillation gamma spectrometer using the Progress software. SE "VNIIFTRI". 1996, 41 p.
8. *Shamshurina E.N., Golosov V.N., Ivanov M.M.* Spatial and temporal reconstruction of the field of deposition of the Chernobyl 137Cs on the soil cover in the upper headstreams of the Lokna river basin. *Radiation biology. Radioecology*. Moscow: Nauka, 2016. V. 56. No 4. P. 414–425 (in Russian).
9. *Shary P.A.* Assessment of the relief-soil-plants interlinkages using new methods of geomorphometry. PhD dissertation (author's abstract). Togliatti, 2005. 25 p. (in Russian).
10. *Trofimetz L.N., Panidi E.A., Chaadaeva N.N., Sankova E.A., Ivanekha T.L., Tyapkina A.P., Petelko A.I., Alexandrova A.P., Ladnova G.G.* Determining 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 InterGIS. *Geoinformation support of sustainable development of territories: Materials of the Intern. conf.* M.: Moscow University Press, 2020. V. 26. Part 3. P. 170–183. DOI: 10.35595 / 2414-9179-2020-3-26-170-183.
11. *Trofimetz L.N., Panidi E.A., Chaadaeva N.N., Tyapkina A.P., Sankova E.A.* On the reserve of Cesium-137 in the arable horizon on the watershed surface of the Sukhaya Orlitsa river basin when establishing the reference value of Cesium-137. VIII Shchukin Readings: Relief and Nature Management. Materials of the All-Russian conference with international participation. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Moscow, September 28-October 1, 2020 [Electronic edition]. Moscow: Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University named, 2020. P. 531–536 (in Russian).
12. *Velichko A., Morozov T.D., Nechaev V.B., Porozhnyakov O.M.* Paleocryogenesis, soil cover and agriculture: monograph. Moscow: Nauka, 1996. 150 p. (in Russian).
13. *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.