

Л.Н. Трофимец<sup>1</sup>, Е.А. Паниди<sup>2</sup>, М.Г. Курочичская<sup>3</sup>, А.П. Александрова<sup>4</sup>, А.П. Тяпкина<sup>5</sup>,  
А.М. Сараева<sup>6</sup>, А.В. Тарасов<sup>7</sup>, А.О. Баркалов<sup>8</sup>, В.И. Степанова<sup>9</sup>, А.А. Лаврусевич<sup>10</sup>,  
А.И. Петелько<sup>11</sup>

## ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕЗИЯ-137 ЧЕРНОБЫЛЬСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭРОЗИОННЫХ ПОТЕРЬ ПОЧВЫ НА УЧАСТКАХ ВЫПАХАННЫХ ПОЧВ В БАССЕЙНЕ ВЕРХНЕЙ ОКИ

### АННОТАЦИЯ

С внедрением в практику землепользования принципов адаптивного (прецизионного) земледелия возрастает актуальность разработки методов расчета потерь почвы по морфометрическим показателям рельефа для распаханых склонов со сложно устроенной поверхностью. В статье рассматриваются возможности применения радиоцезиевого метода к расчету потерь почвы вследствие эрозии на участках сельскохозяйственных полей с выпашанными почвами. Цель исследования – разработать методику расчета эрозионных потерь почвы по удельной активности цезия-137 (как индикатора потерь почвы) в зависимости от морфометрических показателей рельефа (рассчитанных средствами ГИС) для локального экспериментального участка сельскохозяйственного поля, почвы на котором отнесены к разряду выпашанных. Экспериментальный участок находится на сельскохозяйственном поле, расположенном в бассейне реки Сухая Орлица Орловского района Орловской области. В статье приводятся результаты апробации расчетной зависимости (ранее разработанной для ложбин с площадью водосбора 50000 м<sup>2</sup>) для участка с выпашанными почвами. Констатировано, что расчет по апробируемому уравнению дает большие погрешности.

---

<sup>1</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, кафедра географии, экологии и общей биологии, ул. Комсомольская, д. 95, 302026, Орел, Россия; *e-mail*: [trofimec\\_1\\_n@mail.ru](mailto:trofimec_1_n@mail.ru)

<sup>2</sup> 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](mailto:panidi@ya.ru), [e.panidi@spbu.ru](mailto:e.panidi@spbu.ru)

<sup>3</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, кафедра географии, экологии и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, 302026, Орел, Россия; *e-mail*: [m.kuro4@yandex.ru](mailto:m.kuro4@yandex.ru)

<sup>4</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт иностранных языков, кафедра английской филологии, ул. Комсомольская, д. 95, 302026, Орел, Россия; *e-mail*: [angelica.p.alexandrova@yandex.ru](mailto:angelica.p.alexandrova@yandex.ru)

<sup>5</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, кафедра зоологии, ул. Комсомольская, д. 95, 302026, Орел, Россия; *e-mail*: [angelikpt@mail.ru](mailto:angelikpt@mail.ru)

<sup>6</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, кафедра географии, экологии и общей биологии, ул. Комсомольская, д. 95, 302026, Орел, Россия; *e-mail*: [amsaraeva-osu@yandex.ru](mailto:amsaraeva-osu@yandex.ru)

<sup>7</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Медицинский институт, кафедра внутренних болезней, ул. Комсомольская, д. 95, 302026, Орел, Россия; *e-mail*: [arcorel@yandex.ru](mailto:arcorel@yandex.ru)

<sup>8</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, кафедра географии, экологии и общей биологии, ул. Комсомольская, д. 95, 302026, Орел, Россия; *e-mail*: [7oup@mail.ru](mailto:7oup@mail.ru)

<sup>9</sup> ФГБУН Институт биологического приборостроения с опытным производством РАН, ул. Институтская, д. 7, г. Пущино, Московской обл., Россия; *e-mail*: [agroecology@inbox.ru](mailto:agroecology@inbox.ru)

<sup>10</sup> Московский государственный строительный университет, кафедра инженерных изысканий и геоэкологии, Ярославское шоссе, д. 26, 129337, Москва, Россия; *e-mail*: [lavrusevich@yandex.ru](mailto:lavrusevich@yandex.ru)

<sup>11</sup> Новосильская ЗАГЛОС, ул. Семашко, 2а, 303035, Мценск, Россия; *e-mail*: [zaglos@mail.ru](mailto:zaglos@mail.ru)

Предложена разработанная для локального участка с выпаханнми почвами оригинальная зависимость активности цезия-137 от площади сбора, рассчитанной в ГИС. Проверка на независимом материале показала, что погрешность расчета по оригинальной зависимости в 73 % случаев не превышает 20 %. Приводится карта потерь почвы для участка выпаханнх почв, построенная в ГИС на основе разработанной зависимости.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** радиоцезиевый метод, гамма-спектрометрический анализ, интенсивность смыва почвы, ГИС, космические снимки сверхвысокого разрешения

**Lyubov N. Trofimetz<sup>1</sup>, Evgeny A. Panidi<sup>2</sup>, Margarita G. Kurochitskaya<sup>3</sup>,  
Angelica P. Alexandrova<sup>4</sup>, Angela P. Tyapkina<sup>5</sup>, Anna M. Saraeva<sup>6</sup>, Arkady V. Tarasov<sup>7</sup>,  
Aleksandr O. Barkalov<sup>8</sup>, Vera I. Stepanova<sup>9</sup>, Andrey A. Lavrusevich<sup>10</sup>, Anatoly I. Petelko<sup>11</sup>**

### **APPLICATION OF CAESIUM-137 OF CHERNOBYL ORIGIN FOR CALCULATING EROSIONAL LOSSES OF SOIL IN PLOWED SOIL AREAS IN THE UPPER OKA BASIN**

#### **ABSTRACT**

The introduction of the principles of adaptive (precision) farming into the practice of land use makes it relevant to develop methods for calculating soil losses by morphometric indicators of the relief for plowed slopes with a complex surface. The paper considers the possibilities of applying the radiocesium method to the calculation of soil losses due to erosion in areas of agricultural fields with plowed soils. The purpose of the work is to develop a methodology for calculating erosional soil losses by the specific activity of caesium-137 (as an indicator of soil losses) depending on the morphometric indicators of the relief (calculated by GIS tools) for a local experimental site of an agricultural field, the soils on which are classified as plowed. The experimental site is located on an agricultural field, which is in the basin of the Sukhaya Orlitsa River in the Orel District, Orel Region.

---

<sup>1</sup> 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](mailto:trofimetc_1_n@mail.ru)

<sup>2</sup> Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, 10<sup>th</sup> line VO, 33, 199178, St. Petersburg, Russia; *e-mail*: [panidi@ya.ru](mailto:panidi@ya.ru), [e.panidi@spbu.ru](mailto:e.panidi@spbu.ru)

<sup>3</sup> Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, Department of Geography, Ecology and General Biology, Komsomolskaya str., 95, 302026, Orel, Russia; *e-mail*: [m.kuro4@yandex.ru](mailto:m.kuro4@yandex.ru)

<sup>4</sup> Orel State University, Institute of Foreign Languages, Department of English Philology, Komsomolskaya str., 95, 302026, Orel, Russia; *e-mail*: [angelica.p.alexandrova@yandex.ru](mailto:angelica.p.alexandrova@yandex.ru)

<sup>5</sup> Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, Department of Zoology, Komsomolskaya str., 95, 302026, Orel, Russia; *e-mail*: [angelikpt@mail.ru](mailto:angelikpt@mail.ru)

<sup>6</sup> Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, Department of Geography, Ecology and General Biology, Komsomolskaya str., 95, 302026, Orel, Russia; *e-mail*: [amsaraeva-osu@yandex.ru](mailto:amsaraeva-osu@yandex.ru)

<sup>7</sup> Orel State University, Medical Institute, Department of Internal Diseases, Komsomolskaya str., 95, 302026, Orel, Russia; *e-mail*: [arcorel@yandex.ru](mailto:arcorel@yandex.ru)

<sup>8</sup> Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, Department of Geography, Ecology and General Biology, Komsomolskaya str., 95, 302026, Orel, Russia; *e-mail*: [7oup@mail.ru](mailto:7oup@mail.ru)

<sup>9</sup> Institute for biological instrumentation with Experimental Production of the Russian Academy of Sciences, Institutskaya str., 7, Pushchino, Moscow region, Russia; *e-mail*: [agroecology@inbox.ru](mailto:agroecology@inbox.ru)

<sup>10</sup> Moscow State University of Civil Engineering, Department of Engineering Surveys and Geoecology, Yaroslavskoe shosse, 26, 129337, Moscow, Russia; *e-mail*: [lavrusevich@yandex.ru](mailto:lavrusevich@yandex.ru)

<sup>11</sup> Novosilskaya ZAGLOS, Semashko str., 2a, 303035, Mtsensk, Russia; *e-mail*: [zaglos@mail.ru](mailto:zaglos@mail.ru)

The article presents the results of approbation of the calculated dependence (previously developed for depressions with a watershed area of 50,000 m<sup>2</sup>) for a site with plowed soils. It is stated that the calculation according to the tested equation gives large errors. The authors proposed an original dependence of the activity of cesium-137 on the collection area, calculated in the GIS, developed for a local area with plowed soils. A check on independent material showed that the calculation error according to the original dependence did not exceed 20 % in 73 % of cases. A map of soil losses for the site of plowed soils, built in GIS based on the developed dependence, is presented.

**KEYWORDS:** radiocaesium method, gamma spectrometric analysis, soil losses intensity, GIS, ultra-high resolution satellite imagery

## ВВЕДЕНИЕ

Выпаханные почвы представляют собой своего рода деградированные земли. Воздействие обработки почвы на пахотный слой приводит к снижению содержания гумуса в почвенном горизонте 0–30 см на 20–30 %. Это связано как с уменьшением поступления растительных остатков (до 5–6 раз), так и с минерализацией органического вещества вследствие распашки [Кирюшин, 2000]. Согласно исследованиям [Кирюшин, 2000], для лесостепной зоны Русской равнины разница между поступлением растительных остатков в естественные экосистемы и в почвы сельскохозяйственных полей составляет около 5 т/га в год. При этом стабилизация содержания гумуса на более низком уровне (на 15–40 % ниже исходного) происходит через 30 лет. Если на выпашанных почвах наблюдаются потери гумуса более 40–60 %, то они обуславливаются уже эрозией [Таразанова, 2002].

Все вышесказанное позволяет сделать заключение, что выпашанные почвы должны представлять собой особый объект исследования при изучении потерь почвы вследствие эрозии. Выпаханные почвы, являясь малогумусированными, «... всегда менее эрозионно-устойчивы» [Борисов, 2008].

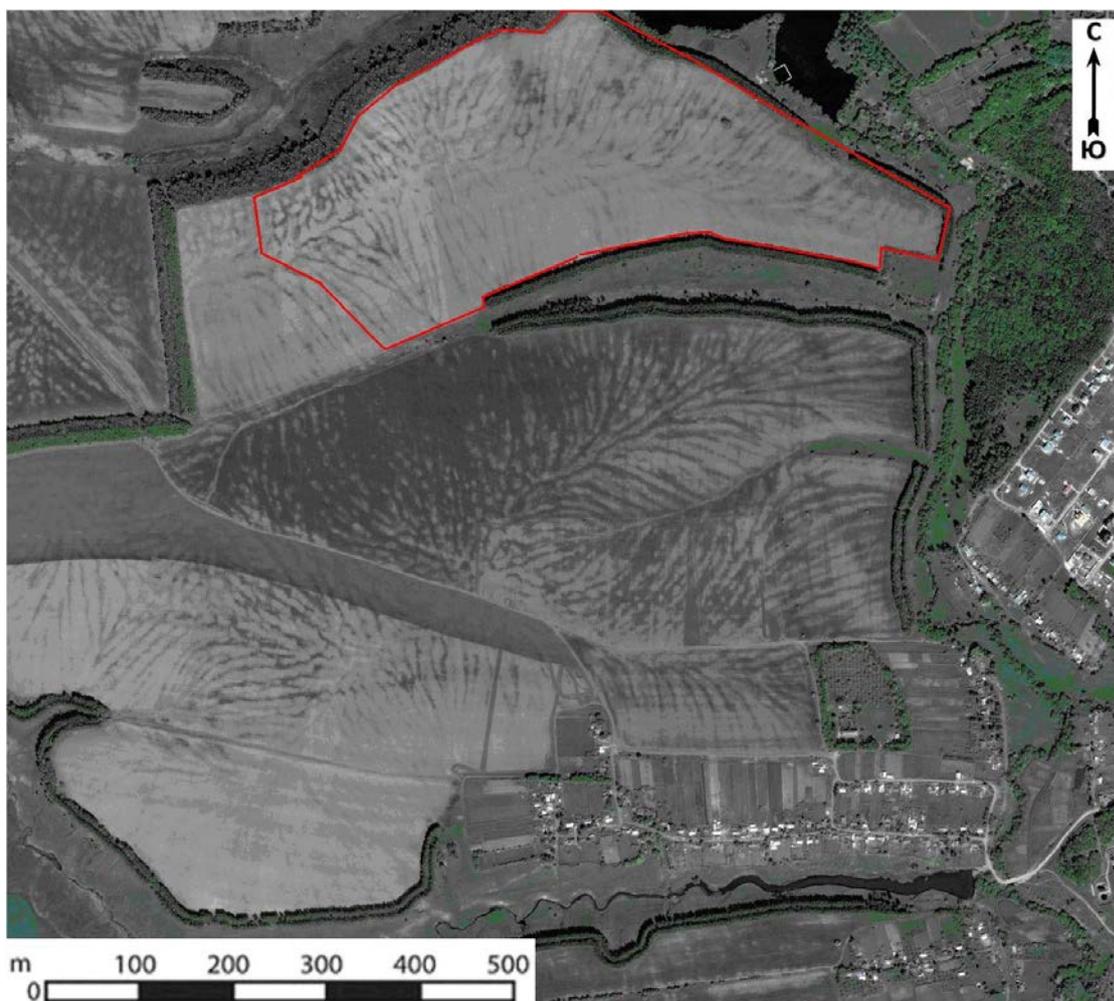
На экспериментальном участке сельскохозяйственного поля в бассейне реки Сухая Орлица (рис. 1) на склоне южной экспозиции были обнаружены выпашанные почвы. Диагностированы они были по цвету космического снимка сверхвысокого разрешения (не более 1 м). Подтверждением правильной диагностики почв как выпашанных явились сниженные значения содержания гумуса в пахотном горизонте (менее 4 %) и подвижного фосфора (не более 8 мг/100г) [Борисов, 2008; Таразанова, 2002].

Под выпашанными почвами авторы статьи понимают почвы, характеризующиеся сниженными значениями гумуса (и подвижного фосфора) в пахотном слое, обусловленные многолетней вспашкой земель без применения органических удобрений [Борисов, 2008; Таразанова, 2002]. Следует заметить, что для корректной идентификации исследуемых почв в качестве выпашанных требуется дополнительно исследовать их на «соотношение лабильных и стабильных форм органического вещества почв» [Борисов, 2008; Таразанова, 2002].

Доказательством эрозионного преобразования выпашанных почв являются сниженные значения активности цезия-137 чернобыльского происхождения и «укороченный» профиль глубины проникновения цезия-137 в почву (с 25 см до 18 см) (рис. 2).

Это определило основную цель настоящего исследования – изучить возможности применения радиоцезиевого метода к оценке потерь почвы вследствие эрозии на участках выпашанных почв. В качестве приоритетных перед авторами статьи были поставлены следующие задачи: 1 – экспериментально исследовать особенности пространственного распределения содержания гумуса в пахотном горизонте на участке сельскохозяйственного поля с выпашанными почвами; 2 – исследовать латеральное распределение цезия-137 в пахотном

горизонте выпаханных почв; 3 – создать ГИС слои содержания в пахотном слое 0–25 см гумуса, активности цезия-137 и морфометрических показателей рельефа для экспериментального участка; 4 – разработать расчетную зависимость активности цезия-137 в пахотном горизонте выпаханных почв от морфометрических показателей рельефа поверхности поля; 5 – рассчитать интенсивность потерь почвы вследствие эрозии на участке выпаханных почв; 6 – построить точечную карту потерь почвы вследствие эрозии для экспериментального участка выпаханных почв.



*Рис. 1. Экспериментальный участок в бассейне реки Сухая Орлица на космическом снимке (снимок доступен в Google Earth™)*

*Fig. 1. Experimental site in the Sukhaya Orlytsa River basin in a satellite image (the image is available on Google Earth™)*

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Основу теоретических построений составили материалы полевых исследований, проводившихся на экспериментальном участке сельскохозяйственного поля в бассейне реки Сухая Орлица Орловского района Орловской области в 2015–2017 гг. Выбор этого поля был обусловлен прежде всего тем, что на данную территорию имелся космический снимок сверхвысокого разрешения (рис. 1). Также использовались открытые данные дистанционного зондирования Земли, снимки, доступные в Google Earth™.

Участок репрезентативен для бассейна левого притока реки Оки – Сухая Орлица. Участок находится в 15 км от города Орла (координаты участка: широта –  $53^{\circ}0'1,58''$ ; долгота –  $35^{\circ}56'44,6''$ ). Почвы на участке серые лесные тяжелосуглинистые. На космическом снимке хорошо различим ложбинный комплекс. Поле пересечено свально-развальными бороздами.

Отбор проб почвы на гамма-спектрометрический и агрохимический анализы проводился из пахотного горизонта 0–25 см (точки назначались вдоль тальвегов свально-развальных борозд) в 2016 г. Тальвеги свально-развальных борозд были выбраны для отбора проб почвы из пахотного слоя по следующим соображениям. Во-первых, вдоль борозд после летних ливней сформировались ручьи. Тальвеги сухих русел этих ручьев хорошо распознавались на местности. Выбирая тальвеги, мы тем самым выбирали участки сельскохозяйственного поля, сходные по генезису формирования эрозионного процесса. Кроме того, известно, что по мере расширения площади водосбора, увеличивается энергия потока, углубляется его русло, тем самым появляется возможность проследить характер изменения активности цезия-137 (как маркера интенсивности эрозионного процесса) по мере увеличения мощности потока и, соответственно, площади водосбора ручья, сформировавшегося в период ливневых осадков в свально-развальной борозде. В пределах этих «стволов эрозии» антропогенного происхождения проводились измерения. Полученные точечные данные были положены в основу поиска расчетных зависимостей активности цезия-137 от морфометрических показателей рельефа на участке выпашанных почв.

В 2016 г. проводилась тахеометрическая съемка в масштабе 1:10000 с отбором проб почвы на агрохимический и гамма-спектрометрический анализы. Точки пробоотбора назначались через 20 м. В процессе GPS-съемки устанавливались координаты точек отбора проб почвы.

Гамма-спектрометрический и агрохимический анализы проводились в центре химизации и сельскохозяйственной радиологии «Орловский». Была создана цифровая модель рельефа (DEM), построенная на основе топографических данных масштаба 1:10000.

Результаты съемки позволили установить особенности распределения цезия-137 и гумуса в пахотном слое на участке выпашанных почв.

Для установления особенностей распределения цезия-137 по глубине в 2015 г. послойно (через 2 см) в тальвегах сухих русел ручьев, сформировавшихся в свально-развальных бороздах на участке выпашанных почв, были отобраны пробы почвы до глубины 60 см (рис. 2). В 2017 г. на блочных повышениях и межблочных понижениях на водораздельной поверхности послойно (через 2 см) отбирались пробы почвы до глубины 80–90 см (для установления опорного значения активности цезия-137) [Трофимец и др., 2020].

Из набора морфометрических показателей рельефа, которые бы наилучшим образом идентифицировали удельную активность цезия-137, выбирались наиболее «информативные» показатели. В нашем исследовании ими оказались площадь сбора (авторы статьи использовали термин «площадь сбора», который был предложен авторами морфометрического показателя, описывающего потенциальную площадь, с которой в искомую точку может смыться почвенный материал) [Costa-Cabral, Burges, 1994; Шарый, 2005] и знак профильной кривизны [Evans, 1972]. На основе цифровой модели рельефа, используя инструменты SAGA GIS, в масштабе 1:10000 (рис. 3 и 4) были построены слои площади сбора (рассчитанной по алгоритму DEMON) и профильной кривизны рельефа. На рисунках 3 и 4 приведены фрагменты карт этих морфометрических показателей. В результате удалось разработать зависимость активности цезия-137 от площади сбора для участка выпашанных почв. Известно, что предел обнаружения  $^{137}\text{Cs}$  в почве на УСК «Гамма Плюс» – 3 Бк/пробу;

погрешность определения – 10–20 %<sup>1</sup>. Исходя из этого, было принято решение оценивать качество расчетной методики по количеству рассчитанных значений активности цезия-137, находящихся в пределах 20 % от измеренных величин. Разработанная в результате зависимость активности цезия-137 от площади сбора для участка выпаханых почв в 73 % случаев показала удовлетворительные результаты. 73 % расчетных значений отклонились от измеренных не более, чем на 20 %.

Был сделан вывод о том, что участки выпаханых почв должны рассматриваться как самостоятельные модельные участки, требующие особого подхода при применении радиоцезиевого метода расчета потерь почвы вследствие эрозии.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для рассматриваемого участка водосбора реки Сухая Орлица (бассейн верхней Оки) был выбран участок выпаханых почв на сельскохозяйственном поле, расположенном на склоне долины реки южной экспозиции с серыми лесными почвами. На космических снимках сверхвысокого разрешения (~0,5 м/пикс)<sup>2</sup> участки выпаханых почв (в области водораздельных поверхностей) распознаются по особому цвету снимка (рис. 1). На рисунке видно, что цвет снимка в пределах придорожной части поля в пределах выпаханых почв (от дороги до пунктирной линии границы участка с выпахаными почвами) имеет более светлый тон. Почвы на этом участке обогащены глинистыми минералами (рис. 2).

Участок выпаханых почв, как видно из фрагмента космического снимка на рисунке 2, пересечен свально-развальными бороздами (ширина борозд 40–50 см, глубина – 10 см). Для почвенного профиля свально-развальных борозд характерным является «укороченный» профиль распределения активности цезия-137 по глубине и невысокое содержание цезия-137 (рис. 2) в слое 0–18 см, что свидетельствует о том, что почвы в точке пробоотбора на рисунке 2 – смытые.

В тальвегах свально-развальных борозд в 2016 г. были отобраны пробы почвы на гамма-спектрометрический анализ (рис. 3).

На рисунке 3 приведены фрагменты космического снимка сверхвысокого разрешения (разрешением 1 м) с точками активности цезия-137. Справа в увеличенном масштабе показан фрагмент участка с выпахаными почвами. Фрагмент в увеличенном масштабе приведен для того, чтобы показать, какие точки использовались при построении расчетной зависимости на рисунке 6. Из рисунка видно, что диапазон удельной активности цезия-137 на участке выпаханых почв составляет 5–140 Бк/кг. Слой удельной активности цезия-137, будучи наложенным на карту площади сбора и карту профильной кривизны (рис. 4), позволил поставить в соответствие активности цезия-137 морфометрические показатели рельефа в данной точке.

Дополнительно для подтверждения того, что почвы на выделенном участке могут быть охарактеризованы как выпаханые, был привлечен анализ карты латерального распределения гумуса в пахотном горизонте 0–25 см, построенной по материалам тахеометрической съемки, проведенной в 2016 г. (рис. 5).

---

<sup>1</sup> Методика измерения активности радионуклидов в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-спектрометре с использованием программного обеспечения «Прогресс». ГП «ВНИИФТРИ». 1996. 41 с.

<sup>2</sup> <https://innoter.com/articles/kosmicheskie-snimki-sverkhvysokogo-razresheniya/>

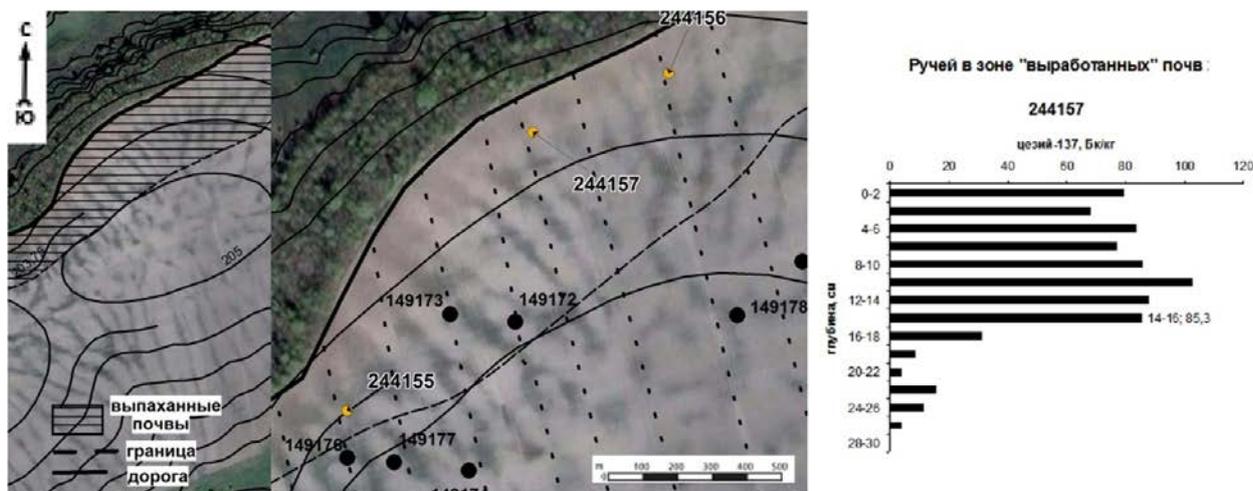


Рис. 2. Слева – фрагмент космического снимка (снимок доступен в Google Earth™) склона южной экспозиции с участком выпаханных почв. В центре – свально-развальные борозды и точки пробоотбора. Справа – диаграмма послойного распределения цезия-137 по глубине (точка пробоотбора расположена в тальвеге свально-развальной борозды) (послойный отбор проб почвы производился в 2015 г.)

Fig. 2. On the left is a fragment of a satellite image (the image is available on Google Earth™) of a slope with a southern exposure with a site of plowed soils. In the center are crown and back furrows and sampling points. On the right is a diagram of the layer-by-layer distribution of cesium-137 in depth (the sampling point is located in the thalweg of the crown and back furrow) (layer-by-layer sampling of the soil was carried out in 2015)

Во время тахеометрической съемки производился отбор проб почвы на содержание цезия-137, гумуса, подвижного фосфора.

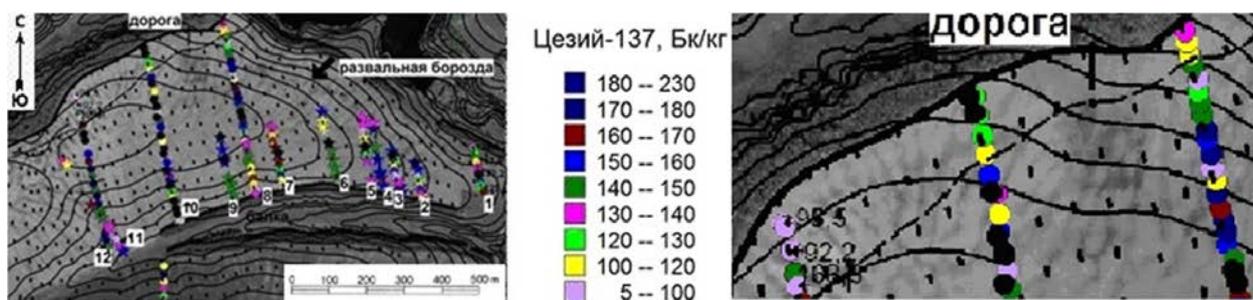


Рис. 3. Фрагмент космического снимка с активностью цезия-137 в точках пробоотбора. Отбор проб почвы производился в 2016 г.

Fig. 3. A fragment of a satellite image showing the activity of caesium-137 at sampling points. Soil sampling was carried out in 2016

На рисунке 5 видно, что выпашанные почвы приурочены к придорожному участку водораздельной поверхности (100–150 м от дороги), испещренному микроложбинами со слабо выраженными руслами. Тахеометрическая съемка проводилась вдоль всего склона (по 10 профилям, отстоящим один от другого на 20 м). На рисунке слева приведены только те точки, в которых значения гумуса меньше 4 %. На рисунке справа – все точки, в которых определялось содержание гумуса. Из рисунка видно, что низкие значения гумуса

приурочены как к водораздельной поверхности (в том числе к участку выпашанных почв), так и к межложбинным водоразделам вдоль падения склона. Эти данные подтверждают выводы почвоведов [Долгополова, 1948; Гумматов и др., 1992; Марусова, 2005] о том, что «...микрорысания на полях глубже пахуются, лучше разделяются бороной, высеv семян происходит здесь на большую глубину, и урожай растений на микрорысаниях обычно более высокий». Это (глубокая пахота и сбор высоких урожаев) сопровождается (при недостаточном внесении органических удобрений) изменением гумусового состояния почв (обеднением пахотного горизонта гумусом).

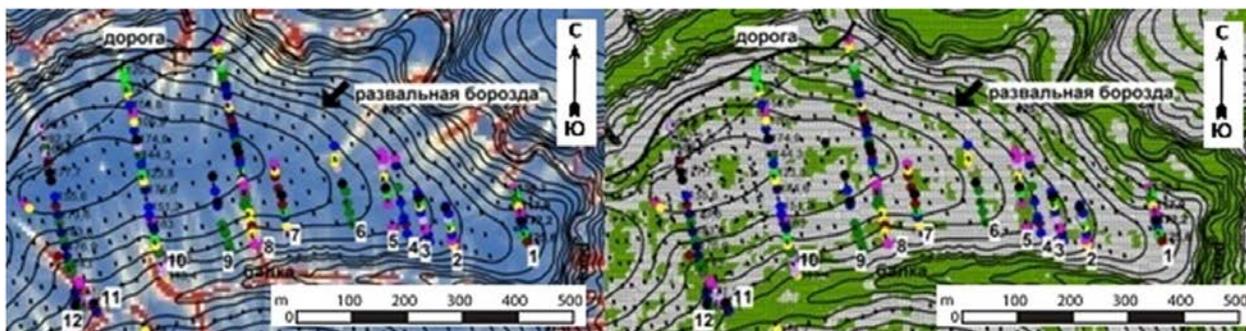


Рис. 4. Фрагменты карт площади сбора (слева) и профильной кривизны (справа).  
12 – номера трансект, вдоль которых отбирались пробы почвы  
(пространственное разрешение сеточных карт – 10 м/пикс)

Fig. 4. Fragments of maps of the collection area (left) and profile curvature (right).  
12 – numbers of transects along which soil samples were taken  
(spatial resolution of grid maps is 10 m/px)

Согласно исследованиям [Драганская, 2008], в обедненной гумусом почве цезий-137 становится более биологически подвижным, он легко переходит в растительную продукцию и выносится с урожаем. Как показали наши исследования, в выпашанных почвах на экспериментальном участке отмечается низкая радиоактивность почв по цезию-137. Видимо, это можно объяснить частично выносом цезия-137 с урожаем [Драганская, 2008], а по большей части – потерями загрязненной радиоцезием почвы, вследствие водной и механической эрозии («стаскиванием» сельскохозяйственной техникой верхнего почвенного слоя с микрорысаний в микроложбины). Высокие эрозионные потери на приводораздельной плоской поверхности (с уклонами не более 1–2°) объясняются, видимо, тем, что «выпаханные почвы наиболее подвержены эрозии» [Борисов, 2008].

Вариабельность сниженных значений цезия-137, указывающая на наличие эрозионных потерь на участке с выпашанными почвами, обусловлена попаданием точек пробоотбора то в эрозионные борозды и в тальвеги микроложбин, то на межложбинные водоразделы. Вариабельность, в свою очередь, позволяет искать зависимость активности цезия-137 от площади сбора и от знака профильной кривизны. Границу участка выпашанных почв, нарушенных эрозией, авторы проводили по границе, маркируемой низкими значениями активности цезия-137 (не более 140 Бк/кг). Это было учтено при построении карты смыва почвы (рис. 8). На этой карте за границу участка (для которого было разработано уравнение № 1 (табл. 1 и рис. 6, 7) была принята не водораздельная линия крупной ложбины (с площадью водосбора 50 000 м<sup>2</sup>), а линия, «маркируемая» границей радиоактивности почвы не более 140 Бк/кг (рис. 3, 4).

Значения активности цезия-137 в границах участка выпашанных почв составили основу выборки, по которой была построена зависимость на рисунке 6. Зависимость носит прямо пропорциональный характер, что нетипично для такого рода зависимостей. Как правило, с ростом площади сбора активность цезия-137 должна уменьшаться (увеличение площади сбора свидетельствует об увеличении мощности потока, смывающего почвенный слой). Однако, поскольку авторы ранее обратили внимание на обратный характер эмпирической зависимости активности цезия-137 от площади сбора для колея от автотранспорта [Трофимец, Февралева, 2019], то предлагают следующее объяснение выявленной в настоящем исследовании прямой зависимости, приведенной на рисунке 6.

Участок выпашанных почв достаточно короткий (не более 100–150 м). Уклоны поверхности не превышают 1,5°. Ручьи, сформировавшиеся в понижениях (в том числе в тальвегах свально-развальных борозд) не могут набрать большую энергию. Площади сбора на участке выпашанных почв небольшие (не более 6000–7000 м<sup>2</sup>), их значения увеличиваются несущественно с увеличением длин ложбин (по причине приводораздельного положения участка). В условиях пологих днищ ручьев «...почва скорее оплывает с бортов, нежели происходит размыв тальвегов русел» [Трофимец, Февралева, 2019]. Вследствие этого (за счет аккумуляции в днищах загрязненной почвы) активность цезия-137 возрастает с увеличением площади сбора.

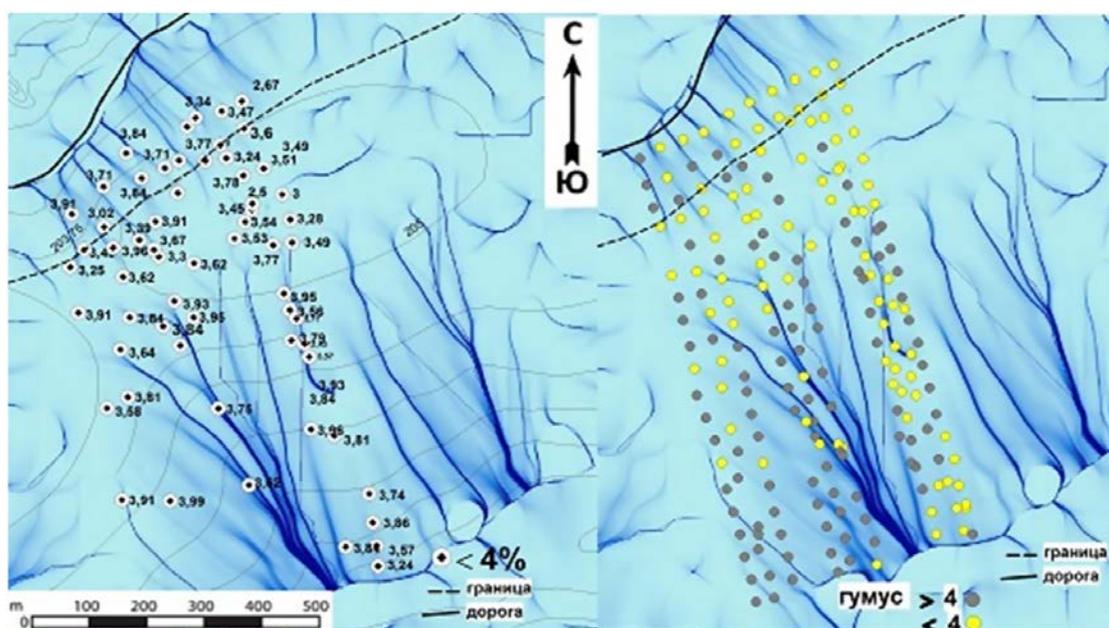


Рис. 5. Фрагмент карты площади сбора с точками пробоотбора и значениями гумуса менее 4 % (слева) и все точки с измеренными значениями гумуса в пахотном слое 0–25 см (пространственное разрешение сеточных карт – 50 см/пикс)

Fig. 5. A fragment of the collection area map with sampling points and humus values less than 4 % (on the left) and all points with measured humus values in the arable layer of 0–25 cm (spatial resolution of grid maps is 50 cm/px)

На следующем этапе осуществлялся расчет интенсивности потерь почвы вследствие эрозии.

Расчет интенсивности смыва почвы (с 1986 г. по 2016 г.) производился по формуле (1):

$$R = 10 \times \frac{BZ_p}{t-t_0} \times (A-1), \quad (1)$$

где  $R$  – смыв почвы, т/га год;  $B$  – плотность серой лесной почвы,  $1100 \text{ кг/м}^3$ ;  $Z_p$  – мощность пахотного горизонта (0,25 м);  $(t-t_0)$  – период (30 лет), прошедший с даты аварии на ЧАЭС (1986 г.) до даты отбора проб почвы (2016 г.);  $A$  – отношение активности цезия-137 в интегральном образце почвы (в точке отбора пробы почвы) к удельной активности цезия-137 на опорном участке. За опорное значение была принята радиоактивность почвы на блочных повышениях водораздела, измеренная в 2017 г. Она составила –  $174,7 \text{ Бк/кг}$  [Трофимец и др., 2021]; 10 – коэффициент перехода к т/га. Поскольку погрешность метода находится в пределах 20 % (а за год, вследствие радиоактивного распада, активность цезия-137 изменяется на 2,23 % [Имшенник, 2011]), то авторы признали нецелесообразным (на данном этапе исследования) приведение к единому временному интервалу (к 2016 г.) измеренных в 2017 г. значений активности цезия-137 на опорной площадке.

В параметр  $A$  формулы (1) включено значение радиоактивности почвы на опорной площадке. Существующие рекомендации по назначению опорного значения [Маркелов, 2004; Walling, He, 1999] требуют в качестве опорного принимать значение удельной активности по результатам статистического анализа выборки, полученной по данным точек пробоотбора на залуженной водораздельной площадке. В случае невозможности найти таковую, опорное значение устанавливается по данным точек на водораздельной поверхности распахиваемого склона при условии, что коэффициент вариации удельной активности цезия-137 для выборки невелик. По мнению авторов статьи, для условий перигляциальной зоны с распространением элементов полигонально-блочного рельефа палеокриогенного происхождения, опорное значение необходимо устанавливать по удельной активности почвы, полученной для блочных повышений [Трофимец и др., 2021]. Эти рекомендации тем более важно учитывать в те годы, когда не выполняется требование распашки поперек склона, и развальные борозды оказывают значительное эродирующее воздействие на распахиваемый склон. На рисунке 2 видно, что при несоблюдении условия тщательного выбора блочных повышений для назначения опорной площадки может встретиться ситуация, когда точка отбора пробы почвы попадет в тальвег межблочного понижения в том месте, где его пересекает развальная борозда (например, точки 149172, 149173, 149176).

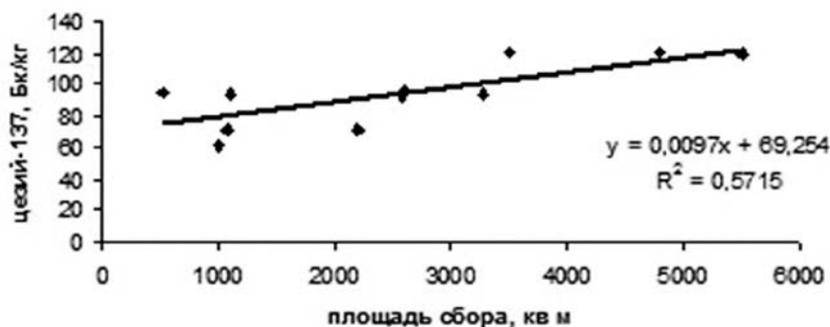


Рис. 6. зависимость активности цезия-137 от площади сбора для участка выпаханых почв

Fig. 6. Dependence of the activity of cesium-137 on the collection area for the site of plowed soils

В таблице 1 приведены уравнения, разработанные для трех участков, выделенных на экспериментальном поле (рис. 7). Уравнение на рисунке 6 было положено в основу построения карты смыва почвы для участка выпаханых почв (участок № 3 на рис. 7), для которого работает уравнение № 3 в таблице 1. Для нижерасположенных склоновых участков применимы уравнения № 1 и № 2 (табл. 1). Граница между участками 1 и 3 проводилась по границе, принятой за границу выпаханых почв (рис. 7).

Табл. 1. Уравнения для расчета активности цезия-137 в пределах участков № 1, 2, 3 (рис. 7)

Table 1. Equations for calculating cesium-137 activity within sites No. 1,2,3 (Fig. 7)

№ уравнения	Уравнение	Условия применения уравнения			
		Площадь водосбора ложбины	экспозиция	Зона смыва (аккумуляции)	Знак профильной кривизны
1	$Y = -0,0004X + 146$ (участок 1 на рис. 7)	$\leq 50000$	южная	смыва	+
1.1	$Y = -0,0004X + 192,99$	$\leq 50000$	южная	аккумуляции	-
2	$Y = -0,0022X + 152,96$ (участок 2 на рис. 7)	$\leq 23000$	южная	смыва	+
2.1	$Y = -0,0021X + 184,15$	$\leq 23000$	южная	аккумуляции	-
3	$Y = -0,0097X + 69,25$ (участок 3 на рис. 7)	$\leq 6000$	южная	смыв	+



Рис. 7. Участки, для которых «работают» уравнения из таблицы 1: № 1 (1 участок), № 2 (2 участок), № 3 (3 участок – выпаханые почвы)

Fig. 7. Sites for which the equations from Table 1 “work”: No. 1 (site 1), No. 2 (site 2), No. 3 (site 3 – plowed soils)

Дополнительно авторы проверили, можно ли для участка выпашанных почв (участок № 3 на рис. 7) использовать уравнения № 1 и 2, разработанные ранее для ложбин с площадями водосбора, соответственно, 50000 м<sup>2</sup> (участок № 1 на рис. 7) и 23000 м<sup>2</sup> (участок № 2 на рис. 7) [Трофимец и др., 2021]. На этом этапе исследований было проведено сопоставление результатов расчета активности цезия-137 для участка выпашанных почв по двум зависимостям (№ 1 и № 2 в табл. 1). Анализ показал, что при расчете по уравнению № 2 неудовлетворительными оказались результаты расчетов активности цезия-137 в 90 % случаях. При расчете по уравнению № 1 удовлетворительные результаты (погрешность которых не превышала 20 % от измеренной величины активности цезия-137) получены в 73 % случаев.

При расчете по оригинальному уравнению (№ 3, разработанному для участка выпашанных почв) также в 73 % случаев ошибка расчетов оказалась в пределах 20 %. Вместе с тем, анализ неудовлетворительных результатов расчета показал, что погрешности 23 % неудовлетворительных результатов расчета по уравнению № 1 достигали значений 50–79 %. Отклонения ошибочных расчетов активности цезия-137 по уравнению № 3 оказались в пределах 21–28 % от их измеренных значений. Этот вывод позволил сделать заключение в пользу принятия к расчету уравнения, полученного для участка выпашанных почв (уравнение № 3).

На рисунке 8 приведена карта интенсивности потерь почвы для трех участков (1, 2, 3 на рис. 7), построенная по трем уравнениям (табл. 1) и формуле (1). Расчет интенсивности смыва по активности цезия-137 (рассчитанной по уравнениям 1, 2, 3 (табл. 1)), осуществлялся по формуле (1). Все расчеты, положенные в основу построения карты (рис. 8), осуществлялись по ЦМР, площади сбора и профильной кривизне, построенных в ArcGIS. На карте видно, что интенсивность смыва почвы на участке с выпашанными почвами достигает 21,2 т/га год.

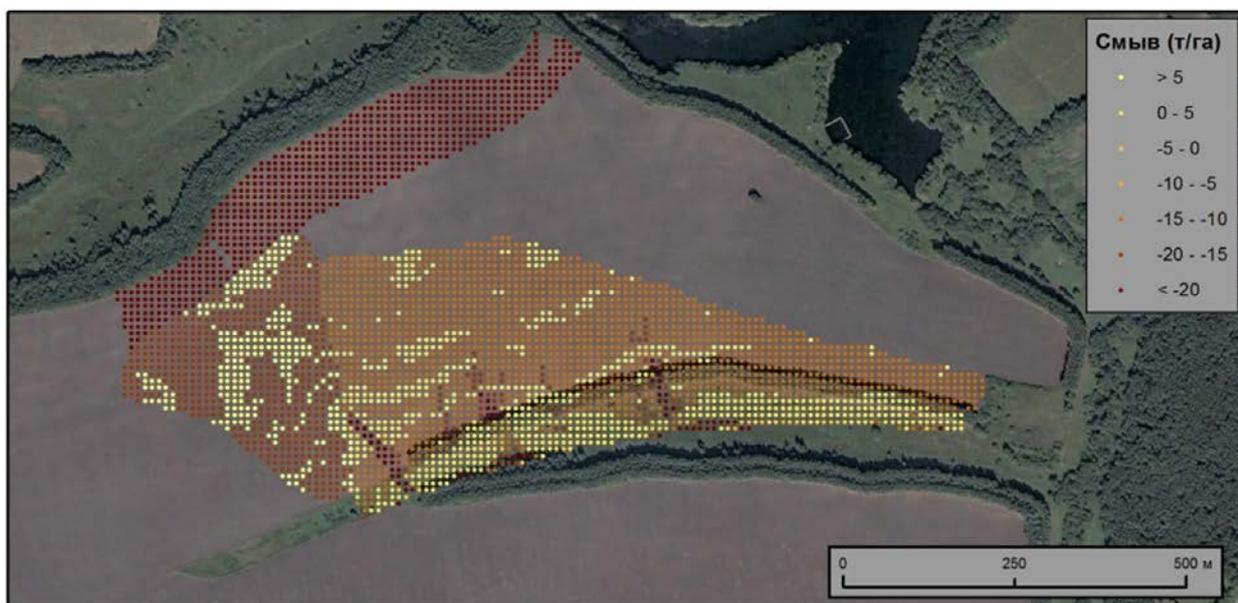


Рис. 8. Карта смыва почвы (т/га год), построенная по уравнениям № 1, 2, 3 (табл. 1) для участков сельскохозяйственного поля № 1, 2, 3 (рис. 7)

Fig. 8. The map of soil losses (t/ha year), built according to equations No. 1, 2, 3 (Table 1) for agricultural field sites No. 1, 2, 3 (Fig. 7)

В результате проведенного исследования сделан вывод о необходимости рассматривать участки выпашанных почв сельскохозяйственных полей как самостоятельные модельные участки с особыми условиями формирования эрозионного процесса. Применение расчетных уравнений, разработанных для ложбин (с использованием таких морфометрических показателей как площадь сбора и профильная кривизна) дают большую погрешность при их применении для расчета активности цезия-137 для участков выпашанных почв. Для этих участков должны разрабатываться свои оригинальные расчетные зависимости.

## ВЫВОДЫ

На сельскохозяйственных полях, удаленных от центральных усадеб, могут формироваться участки с выпашанными почвами. Причина их формирования заключается в том, что длительное время, «начиная с 90-х годов прошлого столетия, органические удобрения на поля вносились в недостаточном количестве» [Борисов, 2008]. Анализируемый в статье участок авторы рассматривают как участок с выпашанными почвами, так как почвы на участке характеризуется сниженным содержанием гумуса (менее 4 %) и подвижного фосфора (менее 8 мг/100г) в пахотном слое. Активность цезия-137 на участке также низкая (не более 140 Бк/кг). Низкую радиоактивность почвы авторы объясняют потерями вследствие водной, а также механической эрозии («стаскиванием» верхнего слоя почвы в микроложбины ниже по склону).

На примере экспериментального участка поля в Орловском районе (бассейн реки Сухая Орлица) показано, что при применении радиоцезиевого метода для оценки потерь почвы вследствие эрозии, необходимо участки выпашанных почв рассматривать как самостоятельные модельные участки с особыми условиями формирования эрозионных процессов. Для участка с выпашанными почвами разработано эмпирическое уравнение зависимости активности цезия-137 от площади сбора, рассчитанной в ГИС. Полученная регрессионная зависимость носит прямо пропорциональный характер. Это объясняется особым режимом формирования эрозионных потерь почвы на приводораздельных участках сельскохозяйственных полей. Малые уклоны (1–2°), небольшие площади сбора (не более 6000 м<sup>2</sup>) обуславливают аккумуляцию загрязненного радиоцезием почвенного материала («оплывающего» с бортов ручьев и формирующего участки повышенной радиоактивности) в тальвегах ручьев, формирующихся в микроложбинах и в свально-развальных бороздах. Использование для участков выпашанных почв расчетных моделей (уравнений), разработанных для ложбин, может привести к большим погрешностям (достигающим 50–79 %). Эти выводы следует учитывать при применении радиоцезиевого метода расчета потерь почвы вследствие эрозии на сельскохозяйственных полях Орловской области.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов Б.А. Легкоразлагаемое органическое вещество целинных и пахотных почв зонального ряда европейской части России. Автореф. дис. ...доктора биол. н. М.: Издательство МСХА им. К.А. Тимирязева, 2008. 43 с.
2. Гумматов Н.Г., Жиромский С.В., Мироненко Е.В., Пачепский Я.А., Щербаков Р.А. Геостатистический анализ пространственной изменчивости водоудерживающей способности серой лесной почвы. Почвоведение. 1992. № 6. С. 52–62.
3. Долгополова Н.Н. Физическая и агрохимическая характеристика почв в условиях Центрально-черноземного государственного заповедника. Труды ЦЧГЗ. 1948. Вып. 2. С. 14–19.
4. Драганская М.Г. Агроэкологическое обоснование применения органических удобрений на радиоактивно загрязненных дерново-подзолистых песчаных почвах юго-

- запада России. Автореф. дис. ...доктора с/х. н. Брянск: Издательство Брянской ГСХА, 2008. 58 с.
5. *Имшенник Е.В.* Картографическое прогнозирование загрязнения <sup>137</sup>Cs наиболее пострадавших в результате аварии на ЧАЭС регионов России. Дис. ... канд. геогр. н. М.: Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, 2011. 141 с.
  6. *Кирюшин В.И.* Экологизация земледелия и технологическая политика. М.: Изд-во МСХА, 2000. 473 с.
  7. *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.
  8. *Марусова Е.А.* Влияние природных и антропогенных факторов на свойства пахотных серых лесных почв южного Подмосковья. Автореф. дис. ...канд. биол. н. М.: Издательство МСХА им. К.А. Тимирязева, 2005. 25 с.
  9. *Таразанова Т.В.* Диагностика степени выпаханности почв зонального ряда Европейской части России. Автореф. дис. ...канд. биол. н. М.: Издательство МСХА им. К.А. Тимирязева, 2002. 148 с.
  10. *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.
  11. *Трофимец Л.Н., Паниди Е.А., Чаадаева Н.Н., Санкова Е.А., Иванеха Т.Л., Тяпкина А.П., Сараева А.М., Александрова А.П., Баркалов А.О., Степанова В.И., Лаврусевич А.А.* Применение радиоцезиевого метода и морфометрических показателей рельефа к расчету интенсивности смыва почвы на распахиваемых склонах в бассейне реки Сухая Орлица. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий. Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 4. С. 135–149. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-4-27-135-149.
  12. *Трофимец Л.Н., Февралева А.А.* Экспериментальные исследования эрозионной активности ручьев антропогенного происхождения на распахиваемых склонах в бассейне верхней Оки. Природные ресурсы Центрального региона России и их рациональное использование. Материалы II Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 60-летию кафедры почвоведения и прикладной биологии Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева. Институт естественных наук и биотехнологии, 2019. С. 238–244.
  13. *Шарый П.А.* Оценка взаимосвязей рельеф–почва–растения с использованием новых методов в геоморфометрии. Автореф. дис. ... канд. биол. н. Тольятти, 2005. 25 с.
  14. *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. Vol. 30. Iss. 6. P. 1681–1692. DOI: 10.1029/93WR03512.
  15. *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.
  16. *Walling D.E., He Q.* Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. J. Environ. Qual. 1999. Vol. 28. No. 2. P. 611–622.

## REFERENCES

1. *Borisov B.A.* Easily decomposable organic matter of virgin and arable soils of the zonal series of the European part of Russia. Author's abstract, dis. ...doctor of biol. sciences. Moscow: Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2008. 43 p. (in Russian).
2. *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. Vol. 30. Iss. 6. P. 1681–1692. DOI: 10.1029/93WR03512.
3. *Dolgoplova N.N.* Physical and agrochemical characteristics of soils in the conditions of the Central Chernozem State Reserve. *Proceedings of TsCHGZ*. 1948. Iss. 2. P. 14–19 (in Russian).
4. *Draganskaya M.G.* Agroecological substantiation of the use of organic fertilizers on radioactively contaminated soddy-podzolic sandy soils of southwestern Russia. Author's abstract, dis. ... doctor of agriculture. Bryansk: Publishing House of the Bryansk State Agricultural Academy, 2008. 58 p. (in Russian).
5. *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.
6. *Gummatov N.G., Zhyromsky S.V., Mironenko E.V., Pachepsky Ya.A., Shcherbakov R.A.* Geostatistical analysis of spatial variability of water-holding capacity of gray forest soil. *Soil science*. 1992. No. 6. P. 52–62 (in Russian).
7. *Imshennik E.V.* Cartographic forecasting of <sup>137</sup>Cs pollution in the most affected regions of Russia as a result of the Chernobyl accident. Dis. ... cand. geogr. sciences. Moscow: Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 2011. 141 p. (in Russian).
8. *Kiryushin V.I.* Ecologization of agriculture and technological policy. Moscow: Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2000. 473 p. (in Russian).
9. *Markelov M.V.* Modern erosion-accumulative processes in the upper links of the hydrographic network of the forest and forest-steppe zones. Author's abstract, dis. ...cand. geogr. sciences. Moscow: Moscow University Press, 2004. 22 p. (in Russian).
10. *Marusova E.A.* Influence of natural and anthropogenic factors on the properties of arable gray forest soils in the southern Moscow region. Author's abstract, dis. ...cand. biol. sciences. Moscow: Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2005. 25 p. (in Russian).
11. *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).
12. *Tarazanova T.V.* Diagnostics of the degree of plowing of soils of the zonal series of the European part of Russia. Author's abstract, dis. ...cand. biol. sciences. Moscow: Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2002. 148 p. (in Russian).
13. *Trofimetz L.N., Fevrалева A.A.* Experimental studies of the erosion activity of streams of anthropogenic origin on plowed slopes in the basin of the upper Oka. Natural resources of the Central region of Russia and their rational use. Proceedings of the II All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 60th anniversary of the Department of Soil Science and Applied Biology, Orel State University named after I.S. Turgenev. Institute of Natural Sciences and Biotechnology. 2019. P. 238–244 (in Russian).
14. *Trofimetz L.N., Panidi E., Chaadaeva N.N., Sankova E.A., Ivaneha T.L., Tyapkina A.P., Saraeva A.M., Alexandrova A.P., Barkalov A.O., Stepanova V.I., Lavrusevich A.A.* 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 InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the

- International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2021. Vol. 27. Part 4. P. 135–149. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-4-27-135-149 (in Russian).
15. *Trofimetz L.N., Panidi E.A., Chaadaeva N.N., Sankova E.A., Ivaneha 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. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference.* Moscow: Moscow University Press, 2020. Vol. 26. Part 3. P. 170–183. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-3-26-170-183 (in Russian).
16. *Walling D.E., He Q.* Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. *J. Environ. Qual.* 1999. Vol. 28. No. 2. P. 611–622.
-