

Л.Н. Трофимец¹, Е.А. Паниди², Б.И. Кочуров³, Н.Н. Чаадаева⁴, А.П. Тяпкина⁵,
А.М. Сараева⁶, А.В. Тарасов⁷, А.О. Баркалов⁸, А.И. Петелько⁹

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЭРОЗИОННЫХ ПОТЕРЬ ПОЧВЫ НА РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКАХ РАСПАХИВАЕМОГО СКЛОНА (БАССЕЙН ВЕРХНЕЙ ОКИ)

АННОТАЦИЯ

В работе приводятся результаты подробных исследований эрозионных потерь почвы с использованием радиоцезиевого метода за послечернобыльский период в пределах экспериментального полигона, расположенного в Орловском районе Орловской области (бассейн верхней Оки). Приводится анализ условий увлажнения в последние десятилетия и в 2021–2022 гг., когда было отмечено увеличение грунтового питания рек и озер. Установлено, что, несмотря на снижение объема талых вод в последние годы, интенсивные апрельские осадки оказывают сильное эродирующее действие на почву. Анализ температурных условий подтвердил факт потепления зимнего сезона в последнее десятилетие и в 2022 г. Эрозионный потенциал талых вод уменьшился почти вдвое. Интенсивные осадки в сентябре – октябре 2021 г., теплая зима и интенсивные дожди в апреле 2022 г. обусловили интенсивный смыв почвы весной. В почве после промерзания и оттаивания нарушается межагрегатное сцепление, и интенсивные весенние осадки формируют смыв. Смыв почвы на изучаемом поле осуществляется по сложной системе ложбин и эрозионных борозд. В статье излагаются основные подходы к разработке полуэмпирической методики расчета потерь почвы вследствие эрозии и разработанные на ее основе уравнения, полученные для 6 участков, отличающихся строением поверхности. Основу методики составили материалы авторских полевых исследований, выполненных в 2014–2017 гг. Оценены зависимости удельной активности цезия-137 от морфометрических показателей рельефа «площадь сбора» и «профильная кривизна». Опорное значение цезия-137 принято по данным послойных измерений по глубине в пределах 3 блочных повышений

¹ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail*: trofimec_l_n@mail.ru

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

³ Институт географии РАН, Старомонетный пер., д. 29, Москва, Россия, 119017, *e-mail*: camertonmagazin@mail.ru

⁴ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail*: n.chaadaeva@list.ru

⁵ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail*: angelikpt@mail.ru

⁶ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail*: amsaraeva-osu@yandex.ru

⁷ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Медицинский институт, Кафедра внутренних болезней, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail*: arcorel@yandex.ru

⁸ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Институт естественных наук и биотехнологии, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, Россия, 302026, *e-mail*: 7oup@mail.ru

⁹ Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, ул. Семашко, д. 2а, Мценск, Россия, 303035, *e-mail*: zaglos@mail.ru

на водораздельной поверхности. Положенные в основу расчета смыва почвы уравнения позволили построить сеточную карту интенсивности эрозионных потерь почвы для склоновой поверхности южной экспозиции. Расчет смыва почвы при условии принятия глубины пахотного слоя 25 см и плотности почвы 1110 г/м³ показал, что на изучаемом участке серых лесных тяжелосуглинистых почв смыв почвы меняется от 5 т/га•г. до более чем 20 т/га•г. Предложенная методика может быть уточнена за счет укрупнения масштаба исследований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радиоцезиевый метод, интенсивность смыва почвы, ГИС, площадь сбора, профильная кривизна

Lyubov N. Trofimetz¹, Evgeny A. Panidi², Boris I. Kochurov³, Natalya N. Chaadaeva⁴, Angela P. Туапкина⁵, Anna M. Saraeva⁶, Arkady V. Tarasov⁷, Aleksandr O. Barkalov⁸, Anatoly I. Petelko⁹

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF EROSIONAL SOIL LOSS IN VARIOUS AREAS OF THE ARABLE SLOPE (UPPER OKA BASIN)

ABSTRACT

The paper presents the results of detailed erosional study of soil loss observed during the post-Chernobyl period. Radiocaesium method was applied in the experimental area located in Oryol district of the Oryol region (Upper Oka basin). The humidification conditions analysis was conducted for recent decades (2021–2022), an increase in the groundwater supply of rivers and lakes was observed. It was found that intense April precipitation has a strong erosional impact onto the soil cover, despite the decrease in the volume of meltwater in recent years. The analysis of temperature conditions confirmed the warming of the winter season in the last decade and in 2022, erosional potential of meltwater has almost halved. Intense precipitation in September and October of 2021, a warm winter and intense rains in April 2022 caused intensive soil washing in spring. The inter-aggregate adhesion is disrupted in the soil after freezing and consequent thawing, so the intense spring precipitation forms a soil washout. Soil runoff in the studied area is carried out by a complex system of furrows and erosional ravines. The article describes the main approaches applied to develop a semi-empirical methodology for erosional soil loss estimation, and the

¹ Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Oryol, 302026, Russia, *e-mail*: trofimetc_1_n@mail.ru

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

³ Institute of Geography RAS, 29, Staromonetny ln., Moscow, 119017, Russia, *e-mail*: camertonmagazin@mail.ru

⁴ Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Oryol, 302026, Russia, *e-mail*: n.chaadaeva@list.ru

⁵ Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Oryol, 302026, Russia, *e-mail*: angelikpt@mail.ru

⁶ Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Oryol, 302026, Russia, *e-mail*: amsaraeva-osu@yandex.ru

⁷ Orel State University, Medical Institute, Department of Internal Medicine, 95, Komsomolskaya str., Oryol, 302026, Russia, *e-mail*: arcorel@yandex.ru

⁸ Orel State University, Institute of Natural Sciences and Biotechnology, 95, Komsomolskaya str., Oryol, 302026, Russia, *e-mail*: 7oup@mail.ru

⁹ Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 2a, Semashko str., Mtsensk, 303035, Russia, *e-mail*: zaglos@mail.ru

equations obtained on its basis for six zones of studied area differing in the structure of the surface. The methodology is based upon the in-situ data collected by authors in 2014–2017. The dependences of caesium-137 specific activity on morphometric variables (namely catchment area and profile curvature) are estimated. The reference value of caesium-137 specific activity was established reducing the results of layer-by-layer in-depth measurements within three block elevations on the watershed. The equations used for the calculation of soil runoff amount were applied to produce a grid map of the soil runoff intensity for the sloping surface of the southern exposure. Estimation of the soil runoff (provided under the conditions of 25 cm arable layer depth and 1110 g/m³ soil material density) shows that in the studied area of gray forest heavy loam soils, the soil runoff value varies from 5 t/ha/year to more than 20 t/ha/year. The proposed methodology can be refined by enlarging the (spatial) scale of research.

KEYWORDS: radiocaesium method, soil runoff intensity, GIS, catchment area, profile curvature

ВВЕДЕНИЕ

Радионуклид цезий-137 все чаще используется как маркер для расчета эрозионных потерь почвы [Ларионов, 1993; Литвин и др., 1996; Walling, He, 1999; Zhidkin et al., 2022]. Используя средства автоматизации, доступные в универсальных географических информационных системах (ГИС), возможно точно оценивать эти потери, если известны точечные значения содержания цезия-137 в почве. Точечные значения, в свою очередь, можно получить в результате отбора проб, сопровождаемого ГНСС-съёмкой (определением координат) точек, в которых из слоя 0–25 см отбираются пробы почвы с последующим их гамма-спектрометрическим анализом. Совместное использование полевых исследований, морфометрического анализа рельефа с использованием ГИС и радиоцезиевого метода делают возможным поиск количественных связей в системе рельеф-почва. Как утверждают Савин с соавторами [Савин и др., 2019], «...при использовании точечных полевых данных в рамках подходов ЦПК (цифрового почвенного картографирования) достаточно составить представительную обучающую выборку и выбрать подходящий метод для построения статистической модели». Применительно к нашей задаче — построению картины латерального распределения потерь почвы на основе радиоцезиевого метода и ГИС, можно утверждать, что в случае, если удастся разработать алгоритм расчета активности цезия-137 чернобыльского происхождения по морфометрическим показателям рельефа для характерных участков изучаемого сельскохозяйственного поля, в первом приближении будут найдены индикаторы для выделения участков поверхности, отличающихся по характеру влияния рельефа на потери почвы. Впоследствии разработанный алгоритм может быть расширен за счет учета свойств почв и других (кроме рельефа) факторов почвообразования. При этом рельеф, несомненно, окажется важнейшим в ряду факторов. Н.М. Сибирцев в 1901 г., говоря о пестроте пахотных земель в России, писал: «комбинаций существует, конечно, много, они весьма различны по качеству участвующих почв и по их количественным соотношениям. Но для каждой местности число их вовсе не безгранично, и они повторяются множество раз с замечательной правильностью и постоянством» [Сибирцев, 1951].

Выбрав в качестве экспериментального участка участок сельскохозяйственного поля, расположенного в пределах склоновой поверхности в Орловской области, в лесостепной зоне, в левобережье р. Оки (в бассейне ее левого притока р. Сухой Орлицы), в зоне серых лесных почв, мы можем ожидать, что разрабатываем алгоритмы, которые могут быть использованы при формировании обучающей модели для определенной комбинации почв, свойственных этой местности. В частности, можно ожидать, что похожие почвенные

комбинации (в пределах склоновых поверхностей, для которых характерен комплекс форм рельефа, существовавших некогда в перигляциальных областях Русской равнины) будут встречаться «с замечательной правильностью и постоянством».

Известно, что в почвенном картографировании формы рельефа с колебаниями относительных отметок 1–10 м относят к формам мезорельефа, до 1 м — микрорельефа, до 30 см — нанорельефа. Такое подразделение с большой достоверностью позволяет устанавливать связь между генетическими типами рельефа и закономерностями пространственного размещения компонентов почвенного покрова [Евдокимова, 1981]. На рассматриваемом экспериментальном участке (рис. 1) встречаются все перечисленные формы рельефа. Сложность учета в расчетных моделях потерь почвы современного строения поверхности состоит еще и в том, что смыв почвы проходит не только по тальвегам ложбин разного размера. Изучаемое поле пересечено свально-развальными бороздами (результат неправильной организации обработки почвы). Анализ спутниковых снимков показал, что свально-развальные борозды разных лет (обнаруживаются на спутниковых снимках) на отдельных участках поля накладываются друг на друга. Причина, видимо, в том, что пахота начиналась от одного и того же «постоянного начала» в разные годы. Понижения в рельефе, как показали полевые наблюдения и анализ спутникового снимка сверхвысокого разрешения (0,5 м/пикс), часто оказываются приуроченными не к тальвегам ложбин, а к тальвегам свально-развальных борозд. Это выясняется при нанесении координат точек отбора проб почвы на спутниковый снимок. Картина усложняется и микроручейковой сетью. Весенний сток талых вод осуществляется по сложной системе ложбин и эрозионных борозд.

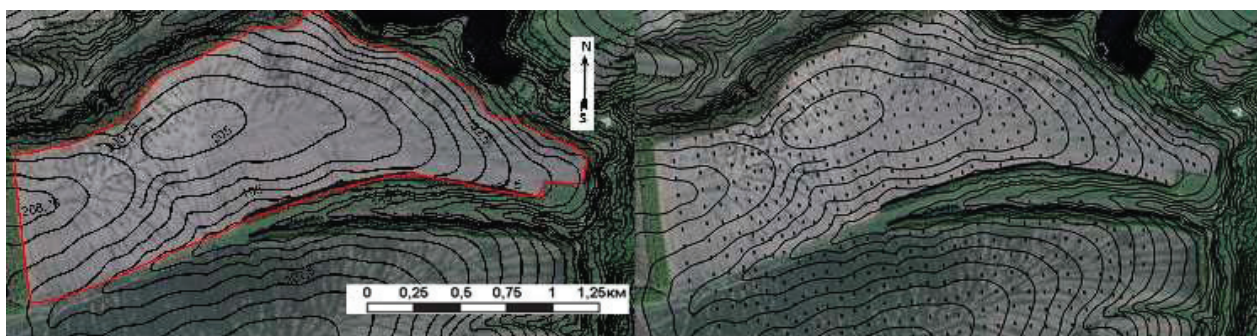


Рис. 1. Экспериментальный участок в бассейне р. Сухая Орлица на спутниковом снимке (слева, выделен красным контуром). Справа пунктиром показаны свально-развальные борозды, ориентированные вдоль падения склона

Fig. 1. Experimental area in the Sukhaya Orlitsa River basin in a satellite image (in the left image, bounded by the red line). In the right the dotted lines show the dump furrows oriented along the dip of the slope

Условия формирования смыва почвы в последние десятилетия изменились. Об этом свидетельствует тот факт, что интенсивность доставки смытой почвы в принимающие балки на рассматриваемом участке в 1986–2020 гг. сократилась по сравнению с периодом 1963–1986 гг. в 1,7–6 р. [Трофимец и др., 2022]. Понять, что в большей степени повлияло на уменьшение смыва почвы в изучаемом регионе можно, проанализировав особенности режима температур и осадков в осенне-зимний и весенний периоды «после-чернобыльских» лет. Зимние месяцы стали теплее. В декабре в 1986–2020 гг. (по сравнению с 1946–1963 гг.) средняя месячная (и максимальная месячная) температура чаще превышала 0 °С (в 4 р. чаще). В последние годы не отмечалось ни одного года, когда бы средняя

месячная температура в январе превысила 0 °С. Но число лет с максимальной температурой в январе, превысившей 0 °С, выросло в 4 р. Число лет с максимальной месячной температурой в феврале, превысившей 0 °С, выросло до 17 в 1986–2020 гг. (в 1946–1963 гг. такие случаи не зарегистрированы). Это говорит о том, что в последние десятилетия увеличилась повторяемость оттепельных периодов, что отмечают многие исследователи. В частности, Долгов с соавторами [2018] утверждают, что «...за период наблюдений с конца 1950-х годов по 2016 год... во время весеннего половодья и за холодный период в целом инфильтрация значительно преобладает над поверхностным склоновым стоком».

Анализ эрозионного потенциала талых вод, проведенный авторами настоящей статьи, показал, что после 1986 г. эрозионный потенциал талых вод уменьшился вдвое. Отдельно приводится анализ условий формирования эрозионного потенциала талых вод в 2022 г., когда впервые за последние годы на реках Орловской обл. было отмечено сравнительно высокое половодье. В 2022 г. заполнилась водой чаша пересыхающего оз. Индовище в Шаблыкинском р-не. Авторы статьи объясняют это сочетанным действием 3 факторов: осенью 2021 г. интенсивные осадки увлажнили почво-грунты на водосборах; зимой оттепели пополнили влагозапасы в почве; весной интенсивные осадки в конце марта – начале апреле вместе с талыми водами сформировали приток в водоемы талых и дождевых вод. Авторы высказывают мнение, что интенсивный смыв почвы в последние годы происходит не столько летом (в результате эродирующего действия ливневых осадков), сколько весной, если интенсивные осадки выпадают в конце марта – начале апреля на почву, оттаявшую с поверхности и ставшую податливой к эродирующему воздействию талых и дождевых вод. Все вышесказанное свидетельствует о том, что для изучаемого экспериментального участка полуэмпирические подходы к построению методики расчета потерь почвы вследствие эрозии являются сегодня наиболее предпочтительными.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эрозионный потенциал талых вод. В работе приводятся результаты анализа условий, влияющих на формирование эрозионного потенциала талых (за период 1959–2016 гг.) и дождевых (1946–2022 гг.) вод. Анализ эрозионного потенциала талого стока проводился с использованием данных Новосильской зональной агролесомелиоративной опытной станции им. А.С. Козменко (ЗАГЛОС). Эрозионный потенциал (E) рассчитывался по формуле (1):

$$E = S \times a_c \quad (1),$$

где S — максимальный запас воды в снежном покрове (мм),
 a_c — интенсивность снеготаяния в часы пик (0,20 мм/мин [Иванова и др., 2020]).

Анализ показал, что на зяби за период 1959–1986 (27 лет) эрозионный потенциал талого стока в 15 годах превысил 20. В 4 из 27 лет эрозионный потенциал талых вод превысил 30 (рис. 2).

После 1986 г. (30 лет) лишь в 9 годах эрозионный потенциал талого стока превысил 20, и ни в одном году не превысил 30. На уплотненной пашне за период 1959–1986 гг. в 17 годах из 27 эрозионный потенциал талого стока превысил 20, в 6 годах превысил 30 и в 1 год превысил 40. После 1986 г. на уплотненной пашне не было ни одного года, когда бы эрозионный потенциал талого стока превысил 40. Лишь в 1987 г. он превысил 30. Превышение эрозионным потенциалом талого стока величины 20 отмечено в 9 годах (это почти в 2 р. меньше, чем до 1986 г.). Приведенные данные свидетельствуют о том, что инфильтрация влаги в почву после 1986 г. была больше, чем до 1986 г. Казалось бы, можно

согласиться с мнением Жидкина с соавторами [Zhidkin et al., 2022], что смыв почвы в последние годы формируется преимущественно ливневыми осадками. Однако полевые наблюдения авторов настоящей статьи показали, что сток по ложбинам и по эрозионным бороздам весной идет достаточно интенсивно (рис. 2). Чем он вызван — талыми водами, осадками или и тем и другим? Для ответа на этот вопрос авторы проанализировали осадки в апреле – мае 2022 г., когда на изучаемом поле были обнаружены следы глубоких эрозионных борозд (рис. 2). Анализ показал, что, скорее всего, в последние годы наиболее интенсивный смыв почвы проходит не летом, а весной. Наиболее интенсивны потери почвы в те годы, когда в период оттепелей нарушается микроагрегатное состояние почвы, и осадки в апреле достаточно интенсивны (превышают 10 мм/сут.). На рисунке 3 видно, что интенсивные осадки в апреле 2022 г. не могли не вызвать формирование разветвленной микроручейковой сети на изучаемом поле, которая выносила почву в балочную сеть. Возникает вопрос, почему на стоковых площадках ЗАГЛОС не фиксировался сток ни с зяби, ни с уплотненной пашни в 2022 г. Этот вопрос остается открытым.

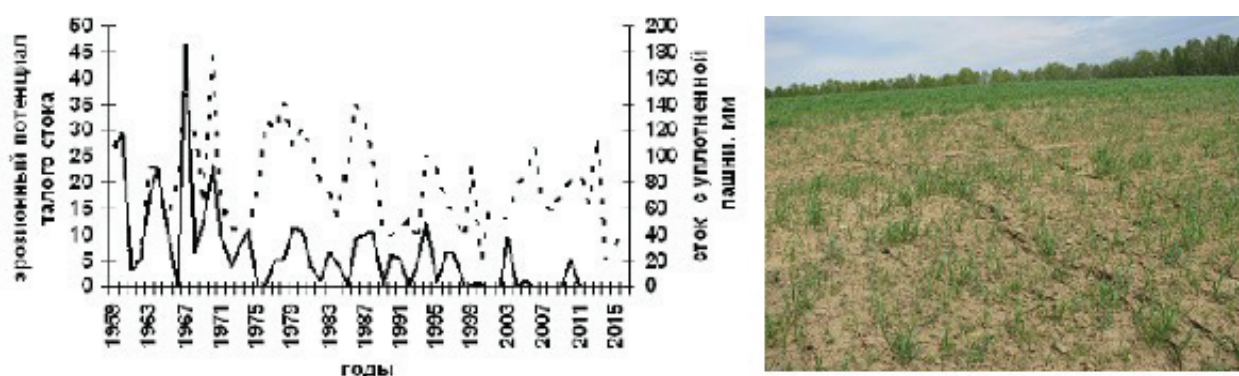


Рис. 2. Слева — совмещенный график хода эрозионного потенциала талых вод и стока с уплотненной пашни. Пунктирная линия — эрозионный потенциал талых вод. Справа — вид эрозионных борозд на местности, на склоне южной экспозиции, май 2022 г. Фото Л.Н. Трофимец

Fig. 2. Combined graphs of the meltwater erosion potential and runoff from compacted arable soil cover — on the left (dotted line is the graph of erosion potential). On the right — a view of erosion furrows on the terrain, southern exposure slope, May 2022. Photo by L.N. Trofimet

Следует согласиться с мнением исследователей степных агроландшафтов Поволжья, что наиболее опасны для потерь почвы интенсивные осадки апреля, мая, июня, сентября [Евсеева и др., 2018]. В эти месяцы поля или еще не защищены всходами сельскохозяйственных культур, или почва находится в состоянии распаханности.

Анализ повторяемости интенсивных осадков по метеостанции Орел показал, что апрель 2022 г. отличался большой повторяемостью интенсивных осадков (табл. 1).

Табл. 1. Повторяемость интенсивных осадков в апреле в 1946–2022 гг. (метеостанция Орел)
Table 1. The frequency of intense precipitation in April of 1946–2022 (Orel weather station)

Период	Апрель (повторяемость интенсивных осадков)		
	10 мм	20 мм	30 мм
1946–1986(41)	32	5	1
1987–2020(34)	9		
2022(1)	9		

Из табл. 1 видно, в апреле 2022 г. за месяц было 9 дней с интенсивными осадками (не менее 10 мм). За 34 года (в 1987–2020 гг.) отмечено всего 9 случаев с осадками такой интенсивности в апреле.

Анализ осадков в летне-осенние месяцы за ряд последних лет (2010–2022 гг.) показал, что ни в одном месяце не отмечалось такой частой повторяемости интенсивных осадков, как в апреле 2022 г. Следовательно, микроручьи (фото на рис. 2) сформировались в результате деятельности талых вод, усиленных интенсивными осадками. На рис. 3 видно, что каждую неделю шли дожди с интенсивностью более 10 мм. Эрозионный потенциал их достигал в марте и апреле 6. Он рассчитывался по формуле (2) [Ларионов, 1993]:

$$D = 0,25841 \times H \times I_{30} - 0,14921 \quad (2),$$

где D — эрозионный потенциал осадков,
 H — слой выпавших осадков (21 мм),
 I_{30} — максимальная интенсивность дождя за 30-минутный интервал, мм/мин (24 мм).

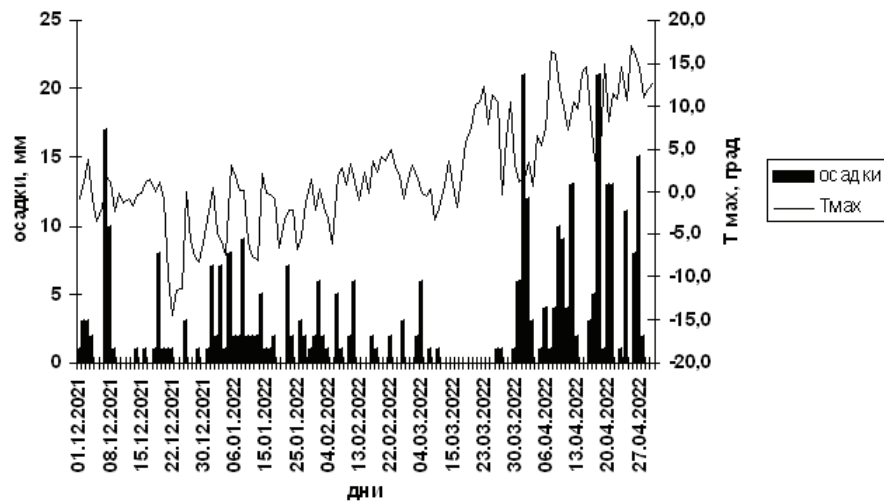


Рис. 3. Совмещенный график хода максимальных температур и осадков (с 01.01.2021 по 27.04.2022)

Fig. 3. Combined graph of the maximum temperature and precipitation values (from 01.01.2021 to 27.04.2022)

Отдельно были проанализированы интенсивные осадки (интенсивностью не менее 10 мм) за период 2011–2022 гг. Именно в этот период (за исключением 2018 г., когда сток с зяби составил 8,1 мм) стоковая площадка ЗАГЛЮС фиксировала в течение всего весенне-осеннего периода нулевой сток с зяби и с уплотненной пашни. В табл. 2 приведена повторяемость осадков разной интенсивности. Обращает на себя внимание, что наиболее часто (3–4 р. в месяц) интенсивные осадки отмечались в июне – августе, а в 2021 и 2022 гг. — и в сентябре – октябре. В сентябре и октябре 2021 г. суточная сумма осадков достигала 27–40 мм, причем в обоих месяцах по 3 дня шли дожди с интенсивностью не менее 10 мм. Такое увлажнение почв осенью привело к увеличению подземного питания водоемов на территории области. Последовавший затем зимний сезон, нарушаемый оттепельными периодами (рис. 3), усугубил ситуацию. Бессточное оз. Индовище (памятник природы в Шаблыкском р-не Орловской обл.), в сухом днище которого авторы в 2020 г. отбирали пробы почвы, весной 2022 г. заполнилось водой (фото на рис. 4). Озеро могло

заполниться водой в результате притока грунтовых вод (запас которых сформировался осенью – зимой 2021–2022 гг.) и апрельских интенсивных осадков.

Таким образом, процесс смыва почвы на изучаемом участке в 2022 г. был подготовлен осенними интенсивными осадками, теплой зимой с оттепелями (максимальные температуры достигали в январе 3,8 °С, в феврале — 4,9 °С, в марте — 12,2 °С), интенсивными осадками в апреле (осадки непрерывно продолжались по 5–14 дней, с максимальным суточным слоем, достигавшим 20 мм). Потери почвы, обусловленные эрозионным воздействием талых вод, вероятно, были наиболее интенсивны с 19 по 29 марта 2022 г. В эти дни максимальная температура находилась в пределах 5–10 °С (рис. 3).

Табл. 2. Повторяемость осадков разной интенсивности в апреле – октябре 2011–2022 гг.
Table 2. The frequency of different intensity precipitation in April – October of 2011–2022

Год	Апрель		Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь	
	≥Хмм	≥10	≥20	≥10	≥20	≥10	≥20	≥10	≥20	≥10	≥20	≥10	≥20	≥10
2011	1		—		1	1	4	3	5	2(30*)	2		—	
2012	1		—		3	1	2		4		—		4	1
2013	1		2	1	3	1		—	2		—		—	
2014	1		4	3	3	1	1		—		1	1 (30)	—	
2015	1		1	1	2	1	1		—		2		—	
2016	2		1	1	3		5	1 (40)	3	1 (40)	—		2	1 (30)
2017	1		1	1	1	1	6	1 (50)	3		—		1	
2018	—		1		—		4	1 (20)	—		1		1	
2019	1		4	2	1	1	2	1 (30)	1		1		1	
2020	—		2		3	1	4	1	—		—		1	
2021	1		—		1		2	1	2		3	3 (1–40)	3	1 (27)
2022	9		1		1	1	2	1	1		4	1	2	1

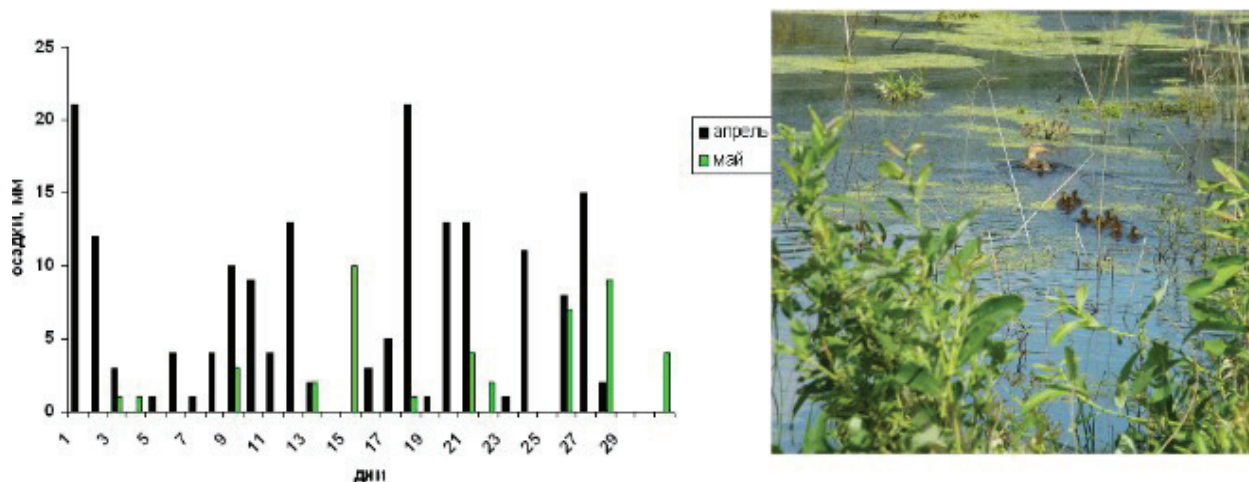


Рис. 4. Совмещенный график хода осадков в апреле – мае 2022 г. (слева). Вид заполненного водой озера Индовище в 2022 г. (справа)

Fig. 4. Combined graph of the precipitation in April – May of 2022 (in the left image).
A view of the Indovishche Lake filled with water in 2022 (in the right image)

Как показали исследования Окулик [2006] «...период весеннего снеготаяния, когда среднесуточная температура воздуха находится в интервале 4,1–5,0 °С, является наиболее опасным в эрозионном отношении. В почве после зимне-весенних циклов промерзания-оттаивания нарушено межагрегатное сцепление. Почва при нарастании положительных температур оттаивает с поверхности и становится чрезвычайно податливой к эродирующему воздействию временных водных потоков». После 29 марта пошли дожди (рис. 3, 4), «заработал» их эрозионный потенциал.

Не менее сложно формируется смыв почвы на разных участках склоновой поверхности. Говоря об эрозионном потенциале рельефа, следует отметить, что поверхность изучаемого поля нарушена системой ложбин разного размера. Воднобалансовые наблюдения на изучаемом участке не ведутся, поэтому расчет потерь почвы вследствие эрозии предпочтительно делать, используя расчетные методы.

Для осуществления цели настоящей работы — разработки подходов к созданию полуэмпирической методики расчета интенсивности потерь почвы вследствие эрозии — авторы в качестве основного метода использовали радиоцезиевый метод.

Радиоцезиевый метод и ГИС. Цезий-137 чернобыльского происхождения, являясь маркером почв разной степени смытости [Шамигурина и др., 2016; Мальцев и др., 2019], позволяет идентифицировать участки, отличающиеся по величине эрозионного потенциала рельефа. В настоящей работе за интегральные показатели эрозионного потенциала рельефа были приняты рассчитанная в ГИС площадь сбора [Шарый, 2005; Costa-Cabral, Burges, 1994] и знак профильной кривизны [Evans, 1972]. В основу выделения характерных участков были положены зависимости активности цезия-137 от площади сбора и знака профильной кривизны.

Были выделены 6 характерных участков, для которых решалась задача создания расчетной методики оценки активности цезия-137, а по ней — смыва почвы в точке. Микроручейковая сеть на склоновой поверхности экспериментального участка сельскохозяйственного поля (рис. 1, 3), которая дополняет систему ложбин и свально-развальных борозд, сформировавшуюся на изучаемом поле за долгие годы пахоты вдоль склона, в настоящей работе не рассматривалась. Она требует отдельного рассмотрения.

Как было сказано выше, наиболее полно учесть смыв почвы со склонов, нарушенных сложной системой эрозионных борозд, можно с помощью радиоцезиевого метода. Почвенно-морфологический метод потребовал бы большого количества прикопок [Zhidkin et al., 2022]. Для создания подробной картины эрозионных потерь необходимо было бы в нашем случае сформировать сеть прикопок в нижней части склона южной экспозиции на выходе из каждой ложбины, а также свально-развальной борозды и микроручья. Это трудоемко. Точечные значения потерь почвы сегодня исследователи рассчитывают с помощью различных моделей эрозии. Жидкин с соавторами [Zhidkin et al., 2022], которые провели верификацию моделей WaTEM/SEDEM (дождевая эрозия) в сочетании с моделью Российского гидрологического института (эрозия при снеготаянии) пришли к выводу, что модели могут занижать величину эрозии до 4 р. По результатам исследования авторы сделали вывод о необходимости калибровки параметров моделей для конкретного региона. Этот вывод говорит о том, что сегодня, помимо уточнения параметров моделей, описывающих «метеорологическую» часть, стоит проблема объективного выделения экспериментальным путем на изучаемых территориях характерных участков с разными условиями формирования эрозионного процесса. Поскольку все элементы эрозионной системы на изучаемом склоне в бассейне р. Сухой Орлицы пока не представляется возможным учесть в схемах расчета, мы поставили задачу выявить на изучаемом поле наиболее характерные участки и разработать для них эмпирические расчетные зависимости. Статистическую выборку составили данные отбора проб за ряд лет (всего

более 500 проб). Расчетные уравнения для ложбин с площадью сбора 23 000 м² и 50 000 м² и для участка предположительно с выпаханнами почвами были опубликованы ранее [Трофимец и др., 2022]. В настоящей статье обосновывается выделение еще 4 участка (участки 4, 4.2, 5, 6), для которых приводятся разработанные уравнения расчета смыва почвы. Статистическая выборка была сформирована в 2016–2017 гг. из точек отбора проб (из пахотного горизонта 0–25 см), назначенных вдоль 12 трансект (рис. 5).

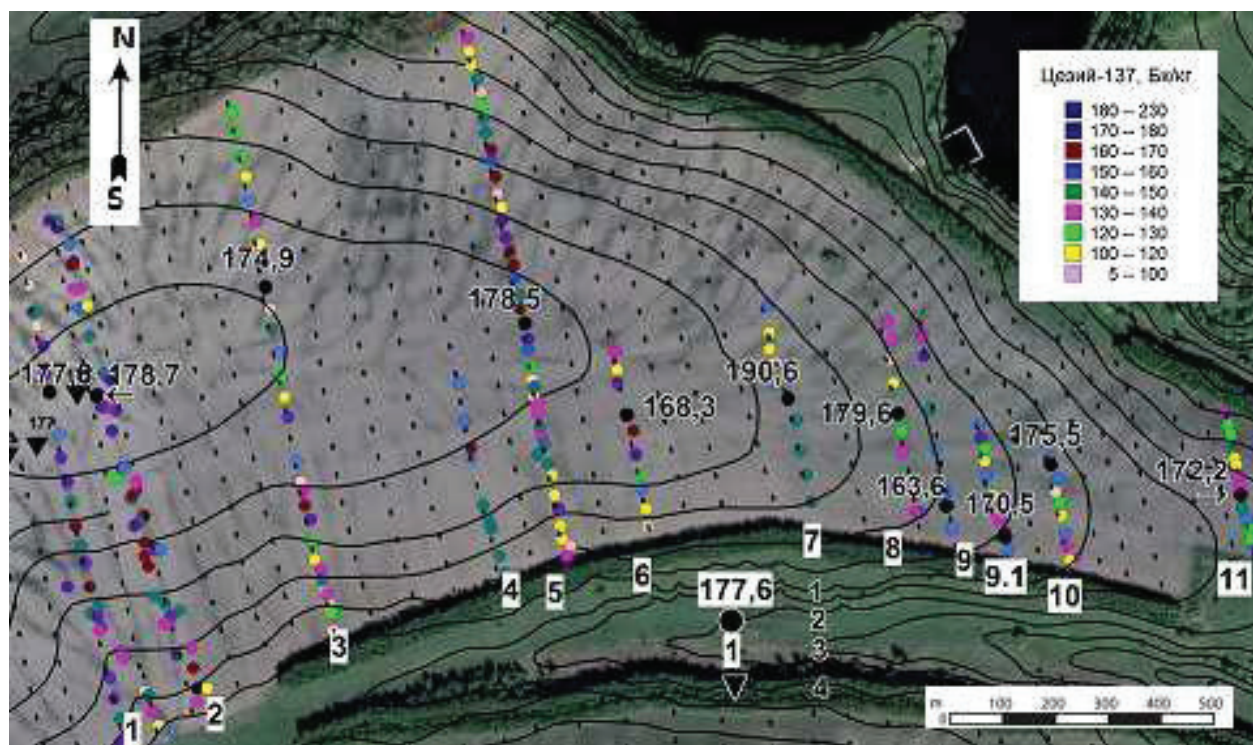


Рис. 5. Точки отбора проб на спутниковом снимке: 1 (177,6) — активность цезия-137 (Бк/кг); 2 — точки, расположенные на водораздельной поверхности; 3 — номера катен;

4 — точки отбора проб, принятые к расчету опорного значения
 Fig. 5. Soil sampling points pointed in the satellite image: 1 (177,6) — caesium-137 activity (Bq/kg); 2 — points on the watershed; 3 — catenae numbers; 4 — sampling points accepted when establishing reference value of caesium-137 activity

Для каждой точки отбора по результатам гамма-спектрометрического анализа проб были получены точечные данные об активности цезия-137. Сеточные карты площади сбора и профильной кривизны использованы для расчета активности цезия-137 по разработанным эмпирическим уравнениям зависимости ее от морфометрических показателей рельефа.

Координаты участка исследования: 53°0'1,58" с. ш., 35°56'44,6" в. д. На участке распространены серые лесные тяжелосуглинистые почвы. Участок можно считать представительным для левобережья верхней Оки в пределах Орловской обл. Точки пробоотбора назначались вдоль тальвегов ложбин и свально-развальных борозд (на момент отбора проб борозды распознавались в поле по характерным продольным углублениям в рельефе) (рис. 5). Назначение точек отбора проб почвы вдоль тальвегов понижений было продиктовано тем, что в качестве предиктора использовался морфометрический показатель «площадь сбора». Площадь сбора — это потенциальная площадь, с которой в каждую точку (пиксель) карты может поступать почва, смываемая с вышерасположенных участков. По мере увеличения площади сбора ложбин должен увеличиваться смыв почвы, что делает

понятным характер процесса и наблюдающееся уменьшение удельной активности цезия-137 по мере увеличения площади сбора. Цифровая модель рельефа (ЦМР) создана по данным топографической основы м-ба 1: 10 000. По ЦМР рассчитаны морфометрические показатели рельефа с использованием инструментов программного обеспечения SAGA GIS.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наложение точек пробоотбора на карту площади сбора показало, что не все катены (трансекты) «попали» в тальвеги ложбин (рис. 6). Так, например, катена № 6 совпала по положению с тальвегом ложбины. Катена № 5 лишь в верхней своей части и в нижней совпала с тальвегами ложбин. Катены №№ 7, 8, 9 попали не в тальвеги ложбин, а в тальвеги свально-развальных борозд (пунктирные линии на рис. 5, 6). Участки аккумуляции смытого почвенного материала удалось маркировать с помощью знака профильной кривизны. На карте профильной кривизны (рис. 6) видно, что зоны аккумуляции (в пределах распахиваемой части склона) пересекают катены №№ 1–3, 5, 6. Катены №№ 7–10 имеют небольшие зоны аккумуляции лишь в своей приводораздельной части. Для этого участка склоновой поверхности знак профильной кривизны при построении расчетных зависимостей не учитывался (т. к. точек в приводораздельной части склона оказалось недостаточно для того, чтобы могла быть сформирована представительная статистическая выборка).

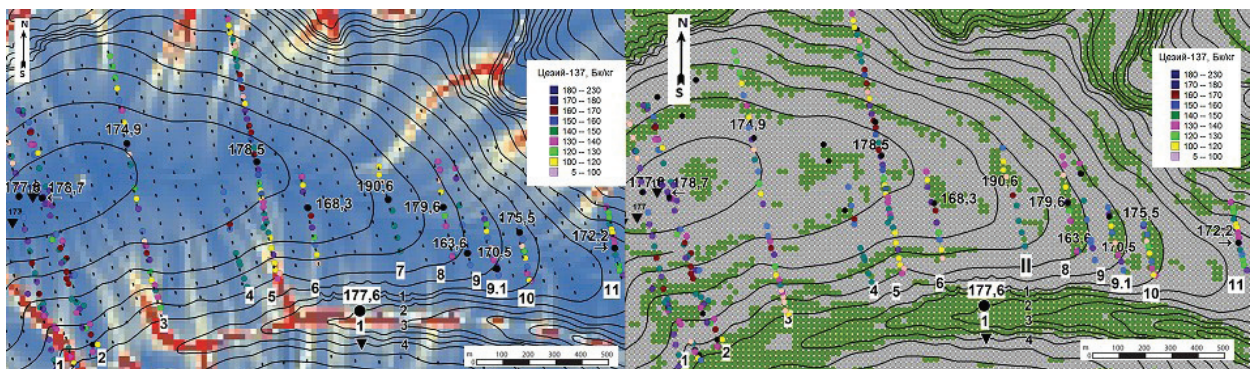


Рис. 6. Карта площади сбора (слева) и профильной кривизны (справа)
Fig. 6. Catchment area (left image) and profile curvature (right image) maps

Следует еще раз заметить, что в поле распознать тальвеги ложбин не всегда представлялось возможным, также не представилось возможным учесть все элементы эрозионной сети на изучаемом склоне. Тем не менее, удалось выделить на склоновой поверхности 6 характерных участков, отличающихся по степени нарушенности поверхности ложбинным комплексом (рис. 7).

Отбор проб почвы вдоль катен (рис. 5) и установление гамма-спектрометрическим методом удельной активности в каждой точке пробоотбора дали необходимую информацию в пределах 6 участков для поиска эмпирических зависимостей активности цезия-137 от морфометрических показателей рельефа. Одновременно с поисками расчетных уравнений решалась задача обоснования положения участка вдоль водораздельной поверхности, в пределах которого следует назначать опорные площадки для выделенных 6 участков.



Рис. 7. Зоны, для которых разработаны уравнения из табл. 3
 Fig. 7. Zones used to develop equations presented in table 3

Табл. 3. Уравнения для расчета активности цезия-137 в пределах зон 1–6 (рис. 7)
 Table 3. Equations for used for estimation of caesium-137 activity in zones 1–6 (fig. 7)

№ уравнения	Уравнение	Условия применения уравнения			
		Площадь сбора	Экспозиция	Зона смыва (аккумуляции)	Знак профильной кривизны
1	$Y = -0,0004X + 146,57$	≤ 50000	южная	смыва	+
	$Y = -0,0004X + 192,99$	≤ 50000	южная	аккумуляции	–
2	$Y = -0,0022X + 152,95$	≤ 23000	южная	смыва	+
	$Y = -0,0021X + 184,15$	≤ 23000	южная	аккумуляции	–
3	$Y = -0,0097X + 69,25$	≤ 6000	южная	(участок «выпаханных почв»)	
4	$Y = -0,0117X + 164,11$	≤ 4200	южная	смыва	+
	$Y = -0,0119X + 188,78$	≤ 4200	южная	аккумуляции	–
4.2	$Y = -0,0596X + 189,69$	$100 \leq 500$	южная	смыв	+
5	$Y = -0,0164X + 178,6$	≤ 4200	южная	смыв	+
6	$Y = -0,0891X + 197,73$	≤ 4200	южная	смыв	+

Анализ карты площади сбора и измеренных значений активности цезия-137 (рис. 5), а также учет ранее сделанных рекомендаций по назначению опорной площадки в пределах блочных повышений на водораздельной поверхности [Трофимец и др., 2022] позволили рекомендовать выбирать «пояс минимальной эрозии» в пределах значений площади сбора 100–500 м². Вариабельность цезия-137 в пределах этого пояса составляет 0,3. Это значит, что выборка однородная, но степень рассеивания значительная. Средние, рассчитанные по однородной выборке, значимы, поэтому мы считаем, что в пределах площади сбора 100–500 м² можно назначать опорные площадки. Выделить площадь сбора, в пределах которой вариабельность активности цезия-137 была бы меньше, не удалось. Эту задачу следует решать отдельно в ходе более крупномасштабных исследований. Ранее [Трофимец и др., 2022] мы установили, что водораздельная поверхность изучаемого участка характеризуется

чередованием блочных повышений и межблочных понижений, вдоль которых возможен смыв почвы. Эти формы рельефа различимы на спутниковых снимках сверхвысокого разрешения. На карте профильной кривизны (рис. 6) видно, что в пределах пояса, названного авторами статьи поясом минимальной эрозии, имеются зоны аккумуляции, характеризующиеся отрицательными значениями профильной кривизны. Для каждого локального участка, вероятно, необходимо уточнять опорное значение цезия-137. При этом выбирать диаграмму распределения цезия-137 по глубине необходимо, следуя рекомендациям, изложенным в работе [Шамигурина и др., 2016]. За опорное значение была принята величина 174,7 Бк/кг [Трофимец и др., 2022]. Это значение использовали при пересчете удельной активности в интенсивность смыва почвы [Трофимец и др., 2022].

Анализ спутникового снимка сверхвысокого разрешения (рис. 1, 5), степени нарушенности поверхности поля свально-развальными бороздами (искажившими картину естественного процесса формирования эрозионных потерь почвы) и карт площади сбора и профильной кривизны (рис. 6) позволил вычленить на рассматриваемой поверхности сельскохозяйственного поля 6 участков, отличающихся по условиям протекания эрозионных процессов (рис. 7) и сформировать для них эмпирические зависимости (табл. 3, рис. 8), по которым, в свою очередь, рассчитаны данные для построения карты интенсивности смыва почвы на склоне южной экспозиции (рис. 9).

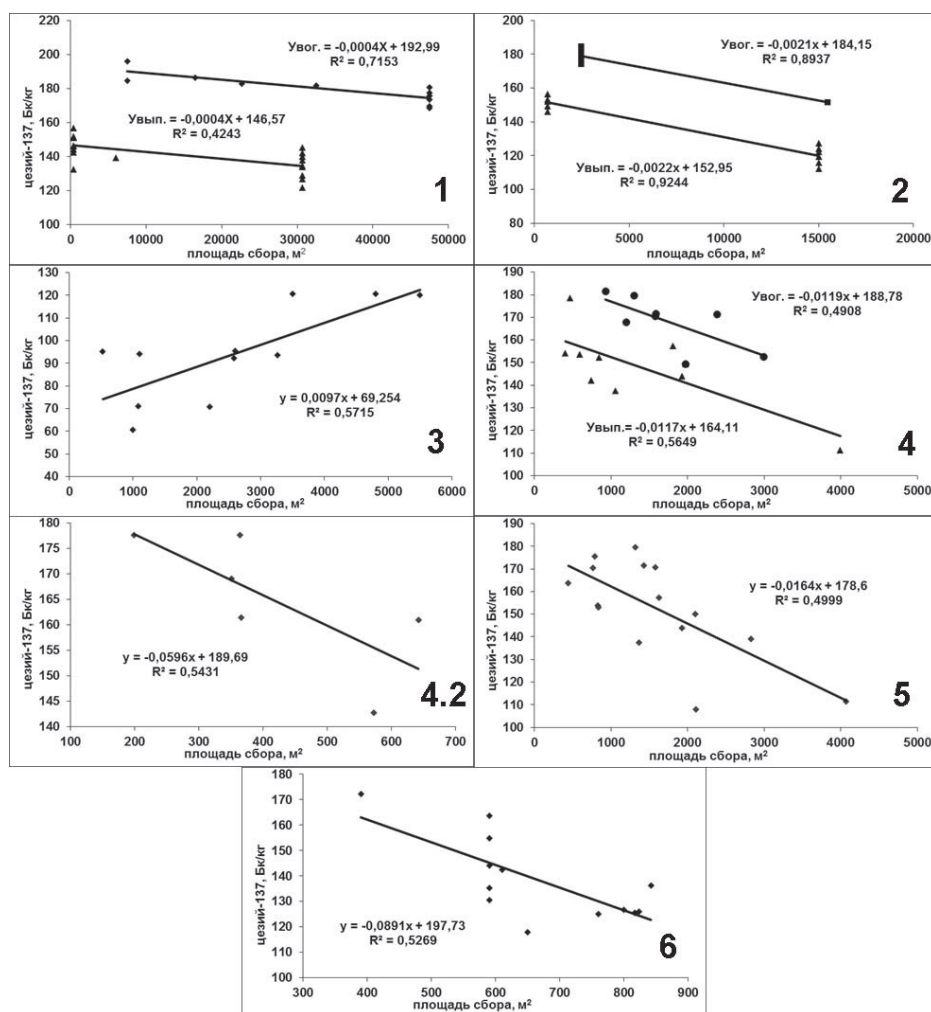


Рис. 8. Расчетные уравнения для зон №№ 1–6 (табл. 3)
 Fig. 8. Equations for zones No.No. 1–6 (table 3)

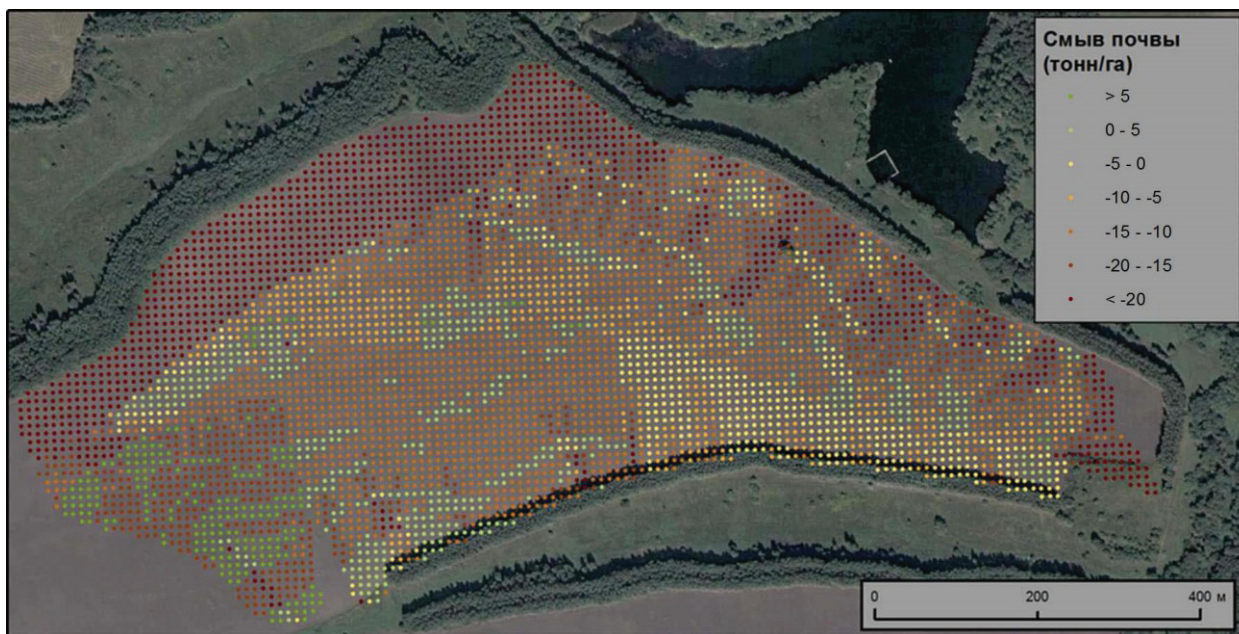


Рис. 9. Карта интенсивности смыва почвы

Fig. 9. Map of soil runoff intensity

Границы участков проводились по водораздельным линиям, за исключением участка № 6. Этот участок включает в себя истоки микроложбин на конечном участке поля. Участок № 1 включает водосбор ложбины с площадью 50000 м². Участок № 2 включает водосборы ложбин с площадью не более 23000 м². Участок № 3 включает часть поля предположительно с выпаханнами почвами. Участок № 4 — склоновая поверхность с площадями сбора не более 4200 м². Участок № 4.2 — приводораздельная поверхность в пределах площадей сбора не более 500 м².

ВЫВОДЫ

Авторские полевые исследования, позволившие получить выборку из более чем 500 значений активности цезия-137, сделали возможным выделить на изучаемом поле 6 участков, отличающихся по характеру статистической связи активности цезия-137 и морфометрических показателей рельефа (площадь сбора и знак профильной кривизны). Выделенный в пределах площадей сбора 100–500 м² пояс минимальной эрозии можно рекомендовать использовать при назначении местоположения опорных площадок (вариабельность активности цезия-137 в пределах пояса — не более 0,3). Уточнение положения пояса минимальной эрозии возможно за счет учета микропонижений на водораздельной поверхности при укрупнении масштаба исследований. Разработанные для 6 участков расчетные уравнения позволили построить сеточную карту интенсивности смыва почвы. Результаты расчета потерь почвы по предложенной в настоящей статье методике в будущем следует подтвердить почвенно-морфологическим методом. Прикопки на участках, замыкающих 6 предложенных характерных участков, позволят подтвердить или опровергнуть целесообразность такого подробного деления склоновой поверхности на расчетные полигоны. Карта интенсивности потерь почвы вследствие эрозии позволяет более точно оценивать потери почвы на склоновых поверхностях, отличающихся микрорельефом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФ, грант № 23-27-00298¹. Спутниковые снимки предоставлены DigitalGlobe Foundation.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out with the support of the RSF, grant № 23-27-00298². Satellite imagery courtesy of DigitalGlobe Foundation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А.* Современные изменения поверхностного стока и инфильтрации талых вод на сельскохозяйственных угодьях в лесостепной и степной зонах Русской равнины и их последствия. Водное хозяйство России, 2018. № 4. С. 78–91.
- Евдокимова Т.И.* Почвенная съемка. М.: Издательство Московского Университета, 1981. 264 с.
- Евсеева Н.С., Квасникова З.Н., Каширо М.А., Батманова А.С.* Факторы развития и интенсивность ливневой эрозии на пашне Томь-Яйского междуречья. Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле», 2018. Т. 23. С. 51–63. DOI: 10.26516/2073-3402.2018.23.51.
- Иванов В.Д., Кузнецова Е.В., Попов В.Г.* Эрозионная опасность как сопряженная функция интенсивности дождя и водопроницаемости почв. Почвоведение, 1990. № 8. С. 106–117с.
- Иванова О.И., Бураков Д.А.* Эрозия почв: учебное пособие. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2020. 103 с.
- Ларионов Г.А.* Эрозия и дефляция почв. М.: Издательство Московского Университета, 1993. 199 с.
- Литвин Л.Ф., Голосов В.Н., Добровольская Н.Г., Иванова Н.Н., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф.* Перераспределение ¹³⁷Cs процессами водной эрозии почв. Водные ресурсы, 1996. Т. 23. № 3. С. 314–320.
- Мальцев К.А., Иванов М.А., Шарифуллин А.Г., Голосов В.Н.* Изменение темпов смыва почвы в речных бассейнах южного мегасклона Европейской части России за последние 30 лет. Почвоведение, 2019. № 6. С. 755–766. DOI: 10.1134/S0032180X19060091.
- Окулик Е.В.* Эрозия почв и миграция химических веществ с талым стоком (на примере серых лесных почв). Дисс... канд. биол. н. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2006. 142 с.
- Осипов А.Г.* Интегральная оценка устойчивости ландшафтов при создании сельскохозяйственных угодий природно-антропогенных систем. Вестник СПбГУ. Серия 7. Геология. География, 2016. Вып. 3. С. 150–162.
- Савин И.Ю., Жоголев А.В., Прудникова Е.Ю.* Современные тренды и проблемы почвенной картографии. Почвоведение, 2019. № 5. С. 517–528. DOI: 10.1134/S0032180X19050101.
- Сибирцев Н.М.* Избранные сочинения. М.: Сельхозгиз, 1951. Т. 1. 472 с.
- Трофимец Л.Н., Паниди Е.А., Курочкицкая М.Г., Александрова А.П., Тяпкина А.П., Сараява А.М., Тарасов А.В., Баркалов А.О., Степанова В.И., Лаврусевич А.А., Петелько А.И.* Прimenение цезия-137 чернобыльского происхождения для расчета эрозионных потерь почвы

¹ Российский научный фонд. Электронный ресурс: <https://rscf.ru/project/23-27-00298/> (дата обращения 23.03.2023).

² Russian Science Foundation. Electronic resource: <https://rscf.ru/project/23-27-00298/> (access date 23.03.2023).

на участках выпаханных почв в бассейне верхней Оки. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 2. С. 813–828. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-813-828.

Трофимец Л.Н., Паниди Е.А., Лаврусевич А.А. Некоторые особенности применения радиоцезиевого метода изучения потерь почвы вследствие эрозии в перигляциальной области бассейна верхней Оки. Геоморфология, 2022. Т. 53. № 5. С. 155–162. DOI: 10.31857/S0435428122050170.

Шамишурина Е.Н., Голосов В.Н., Иванов М.М. Пространственно-временная реконструкция поля выпадения чернобыльского ^{137}Cs на почвенный покров в верховьях бассейна реки Локны. Радиационная биология. Радиоэкология, 2016. Т. 56. № 4. С. 414–425.

Шарый П.А. Оценка взаимосвязей рельеф-почва-растения с использованием новых методов в геоморфометрии. Автореферат дисс... канд. биол. наук. Тольятти: Институт экологии Волжского бассейна РАН, 2005. 23 с.

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. Iss. 6. P. 1681–1692. DOI: 10.1029/93WR03512.

Evans L.S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. Spatial Analysis in Geomorphology. London: Methuen & Co. Ltd., 1972. P. 17–90.

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.

Zhidkin A., Gennadiev A., Fomicheva D., Shamshurina E., Golosov V. Soil erosion models verification in a small catchment for different time windows with changing cropland boundary. Geoderma, 2023. V. 430. Art. 116322. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116322.

REFERENCES

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. Iss. 6. P. 1681–1692. DOI: 10.1029/93WR03512.

Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Barabanova E.A. Modern changes in surface runoff and infiltration of meltwater on agricultural lands in the forest-steppe and steppe zones of the Russian Plain and their consequences. Water Sector of Russia, 2018. No. 4. P. 78–91 (in Russian).

Evans L.S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. Spatial Analysis in Geomorphology. London: Methuen & Co. Ltd., 1972. P. 17–90.

Evdokimova T.I. Soil survey. Moscow: Moscow University Press, 1981. 264 p. (in Russian).

Evseyeva N.S., Kvasnikova Z.N., Kashiro M.A., Batmanova A.S. Development factors and intensity of heavy rains erosion on the arable land of the Tom-Yaya interfluvium. Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya “Nauki o Zemle” (The Bulletin of Irkutsk State University. Series “Earth Sciences”), 2018. V. 23. P. 51–63 (in Russian). DOI: 10.26516/2073-3402.2018.23.51.

Ivanov V.D., Kuznetsova E.V., Popov V.G. Erosion hazard as a conjugate function of rain intensity and soil permeability. Eurasian Soil Science, 1990. V. 8. P. 106–117 (in Russian).

Ivanova O.I., Burakov D.A. Soil erosion: Study guide. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agricultural University, 2020. 103 p. (in Russian).

- Larionov G.A.* Soil erosion and deflation. Moscow: Moscow University Press, 1993. 199 p. (in Russian).
- Litvin L.F., Golosov V.N., Dobrovolskaya N.G., Ivanova N.N., Kiruhina Z.P., Krasnov S.F.* Redistribution of ^{137}Cs by processes of water erosion of soil cover. *Water Resources*, 1996. V. 23. No. 3. P. 314–320 (in Russian).
- Maltsev K.A., Ivanov M.A., Sharifullin A.G., Golosov V.N.* Changes in the rate of soil loss in river basins within the southern part of European Russia. *Eurasian Soil Science*, 2019. No. 6. P. 755–766 (in Russian). DOI: 10.1134/S0032180X19060091.
- Okulik E.V.* Soil erosion and migration of chemicals with melt runoff (on the example of gray forest soils). Diss... PhD of biological sciences. Moscow: Moscow State University, 2006. 142 p. (in Russian).
- Osipov A.G.* Integral assessment of landscape stability when establishing agricultural lands in natural and anthropogenic systems. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*, 2016. V 3. P. 150–162 (in Russian).
- Savin I.Yu., Zhogolev A.V., Prudnikova E.Yu.* Modern trends and problems of soil mapping. *Eurasian Soil Science*, 2019. No. 5. P. 517–528 (in Russian). DOI: 10.1134/S0032180X19050101.
- Shamshurina E.N., Golosov V.N., Ivanov M.M.* Spatiotemporal reconstruction of the Chernobyl origin ^{137}Cs fallout field on the soil cover in the upper Lokna River basin. *Radiation biology. Radioecology*, 2016. V. 56. No. 4. P. 414–425 (in Russian).
- Shary P.A.* Assessment of the relief-soil-plants interlinkages using new methods of geomorphometry. Abstract of diss... PhD of biological sciences. Tolyatti: Institute of Ecology of the Volga Basin of RAS, 2005. 25 p. (in Russian).
- Sibirtsev N.M.* Selected works. Moscow: Selkhozgiz, 1951. V. 1. 472 p. (in Russian).
- Trofimetz L.N., Panidi E.A., Kurochitskaya M.G., Alexandrova A.P., Tyapkina A.P., Saraeva A.M., Tarasov A.V., Barkalov A.O., Stepanova V.I., Lavrusevich A.A., Petelko A.I.* Application of caesium-137 of Chernobyl origin for calculating erosional losses of soil in plowed soil areas in the upper Oka Basin. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference*. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2022. V. 28. Part 2. P. 813–828 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-813-828.
- Trofimetz L.N., Panidi E.A., Lavrusevich A.A.* Some features of the radiocaesium method applied to study of soil losses due to erosion on the periglacial area of the Upper Oka basin. *Geomorfologiya*, 2022. V. 53. No. 5. P. 154–161 (in Russian). DOI: 10.31857/S0435428122050170.
- 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.
- Zhidkin A., Gennadiev A., Fomicheva D., Shamshurina E., Golosov V.* Soil erosion models verification in a small catchment for different time windows with changing cropland boundary. *Geoderma*, 2023. V. 430. Art. 116322. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116322.