

Л.Н. Трофимец¹, Е.А. Паниди², Н.Н. Чаадаева³, Е.А. Санкова⁴, Т.Л. Иванёха⁵,
А.И. Петелько⁶

**ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ПОТЕРЬ ПОЧВЫ В ТАЛЬВЕГАХ РУЧЬЁВ,
СФОРМИРОВАННЫХ ЛИВНЕВЫМИ ОСАДКАМИ
В РАЗВАЛЬНЫХ БОРОЗДАХ НА РАСПАХИВАЕМЫХ СКЛОНАХ:
ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ, ГИС
И РАДИОЦЕЗИЕВОГО МЕТОДА**

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты исследования процесса формирования эрозионной сети природно-антропогенного происхождения на распахиваемом склоне в бассейне верхней Оки (Орловская область). На примере 2014 года показано, что интенсивные осадки (суточная сумма которых сравнима со средней многолетней месячной суммой), выпавшие в период, когда поле не было защищено растительностью (в конце июня и сентября 2014 года), сформировали ручейковую сеть, пространственная организация которой своим происхождением обязана развальным бороздам. Обнаружить этот факт помог спутниковый снимок от 7 июля 2014 года. Измерение активности цезия-137 чернобыльского происхождения в почве тальвегов древних ложбин стока и тальвегов ручьёв, сформированных ливневыми дождями лета-осени 2014 года в развальных бороздах, сделало возможным оценку зависимостей активности цезия-137 от морфометрических параметров рельефа, рассчитанных средствами ГИС (площади сбора и профильной кривизны рельефа) как для древних ложбин стока, так для ручьёв. В результате сравнительного анализа было обнаружено, что на склоне северной экспозиции смыв почвы в ручьях, сформированных в развальных бороздах, превышает смыв почвы в древних ложбинах стока более чем на 20 % (вплоть до 50 %) при сопоставимых значениях площади сбора. Смыв почвы в ручьях можно прогнозировать по полученным зависимостям для ложбин стока (при условии введения соответствующих повышающих коэффициентов), если имеются спутниковые снимки июня-сентября и срочные данные по атмосферным осадкам. Смыв почвы в колеях от техники (при принятии допустимой погрешности оценки смыва почвы в 20 %) можно рассчитывать по уравнениям, полученным для межложбинных поверхностей. Там, где ручьи пересекают древние ложбины стока, расчёт смыва почвы должен осуществляться по зависимостям, полученным для древних ложбин стока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: спутниковые снимки, удельная активность цезия-137, ложбины, развальные борозды, ГИС

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

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

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

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

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

⁶ Новосильская ЗАГЛОС, улица Семашко, 2 а, 303035, Мценск, Россия, *e-mail: zaglos@mail.ru*

**Lyubov N. Trofietz¹, Evgeny A. Panidi², Natalia N. Chaadaeva³, Elena A. Sankova⁴,
Taras L. Ivaneha⁵, Anatoly I. Petelko⁶**

**ESTIMATION OF THE QUANTITY OF SOIL LOSS
IN THE THALWEGS OF THE STREAMS FORMED BY HEAVY RAINFALLS
IN THE BREAKUP FURROWS AT ARABLE SLOPES:
APPLICATION OF SATELLITE IMAGERY, GIS AND RADIOCESIUM METHOD**

ABSTRACT

The paper presents some results of the study of natural-anthropogenic erosion network formation on open slope in the upper Oka basin (Orel region). On the example of 2014, it is shown that intensive precipitation (daily amount is comparable to the multi-year-averaged monthly amount), fell during the period when the field is not protected by vegetation (end of June and end of September, 2014), formed a breakup-furrow-based stream network. The satellite image collected on July 7, 2014 helped to detect this fact. Measurements of activity of the Chernobyl origin cesium-137 in the soil of thalwegs of the ancient ravines and modern streams (formed by the heavy rains of the summer and autumn of 2014 in breakup furrows), made it possible to estimate dependencies between cesium-137 activity and morphometric parameters of relief (catchment area and profile curvature) estimated by means of GIS for ancient ravines and modern streams. As a result of comparative analysis, it was found that the soil runoff on the Northern aspect slope in modern streams exceeds the runoff in the ancient ravines for more than 20 % (up to 50 %), while the values of catchment area are comparable. Soil runoff in modern streams can be predicted using the dependencies obtained for ancient ravines (applying corresponding raising factors) if June-September satellite imagery and precipitation monitoring data are available. Soil runoff in the tracks of agricultural machinery (with the 20 % evaluation error) can be estimated using equations obtained for inter-ravine surfaces. Where streams cross ancient ravines, calculation of soil washout must be performed by dependencies obtained for ancient ravines.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: satellite imagery, specific activity of cesium-137, ravines, breakup furrows, GIS

ВВЕДЕНИЕ

В условиях, когда интенсивные осадки (более 10 мм/сутки) выпадают на не защищённые растительным покровом подготовленные к севу поля после залежи (в северной лесостепи это июнь – сентябрь), активизируется деятельность ручьёв природно-антропогенного происхождения. Эти ручьи своим происхождением обязаны развальным бороздам (которые, как правило, образуются в процессе подготовки полей к севу, то есть после дискования, проводимого с целью уничтожения сорняков). Помимо этих ручьёв, смыв почвы осуществляется по тальвегам древних ложбин стока. Эти элементы эрозионной сети хорошо распознаются, например, на топографических картах масштаба 1:10 000. К перечисленным

¹ Orel State University named after I.S. Turgenev, Faculty of Natural Sciences, Department of Geography, Komsomolskaya st., 95, 302026, Orel, Russia, *e-mail*: **trofimetc_1_n@mail.ru**

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

³ Orel State University named after I.S. Turgenev, Faculty of Natural Sciences, Department of Geography, Komsomolskaya st., 95, 302026, Orel, Russia, *e-mail*: **n_chaadaeva@list.ru**

⁴ Orel State University named after I.S. Turgenev, Faculty of Natural Sciences, Department of Geography, Komsomolskaya st., 95, 302026, Orel, Russia, *e-mail*: **alena7orel@yandex.ru**

⁵ Center of Chemicalization and Agricultural Radiology “Orlovsky”, Molodezhnaya st., 7, 302502, Orel, Russia, *e-mail*: **ivaneha.taras@gmail.com**

⁶ Novosilskaya ZAGLOS, Semashko st., 2a, 303035, Mtsensk, Russia, *e-mail*: **zaglos@mail.ru**

элементам эрозионной сети могут добавляться элементы эрозионной сети, обусловленные другими причинами антропогенного происхождения (например, колеи от автотранспорта). Для распознавания элементов природно-антропогенной эрозионной сети возможно привлечь как материалы крупномасштабной топографической съёмки анализируемого участка, так и спутниковые снимки сверхвысокого пространственного разрешения (0,5 м/пикс). Смыв почвы существенно ухудшает показатели плодородия почвы, поэтому оценка вклада каждого компонента эрозионной сети в процесс потери почвой питательных веществ остаётся весьма актуальной.

В связи с этим по-прежнему значимыми являются поиски таких методов расчёта смыва почвы на распахиваемых склонах по картографическим данным, которые учитывали бы смыв почвы в элементах эрозионной сети, не отображаемых на картах. Большие возможности при проведении этих исследований даёт привлечение ГИС-анализа к расчёту и картографированию морфометрических показателей рельефа. Рельеф (как индикатор смыва почвы) в таких исследованиях является наиболее информативным [Шарый, 2005 и другие работы]. Для экспериментального установления смыва почвы активно используются ландшафтно-индикационные методы и методы маркеров (в частности, радиоцезиевый). Цезий-137 чернобыльского происхождения хорошо маркирует величину и интенсивность смыва почвы [Голосов, 2006; Линник, 2008; Маркелов, 2004; Жидкин и др., 2015; Fulajtar, 2003; Owens, Walling, 1996 и другие работы]. Один из подходов при анализе рельефа основывается на выделении в пределах водосбора однородных морфологических элементов [Ferro et al., 1998], для каждого из которых определяется смыв.

В условиях распахиваемых склоновых поверхностей топографические карты масштаба 1:10 000 (применяемые в землепользовании) и построенные на их основе средствами ГИС карты морфометрических характеристик рельефа могут служить основой для расчёта смыва почвы. В этом случае морфологическими элементами эрозионной сети могут выступать тальвеги древних ложбин стока (участки наиболее интенсивного смыва почвы) и межложбинные водоразделы (участки относительно несмытых или слабосмытых почв). Разумеется, это лишь основные морфологические элементы. Эти элементы эрозионной сети являются наиболее характерными участками распахиваемого склона, в пределах которых смыв осуществляется с разной степенью интенсивности. Следующая группа элементов эрозионной сети, имеющих природно-антропогенное происхождение, – это тальвеги ручьёв, действующих в период высокого стока (талого или ливневого). Древние ложбины стока и ручьи природно-антропогенного происхождения изучались на экспериментальном полигоне в пределах распахиваемых склонов южной и северной экспозиции в бассейне реки Сухая Орлица (бассейн верхней Оки). Почвы – серые лесные пахотные – явились объектом исследования. Предмет исследования – смыв почвы в пределах перечисленных элементов природной и природно-антропогенной сети и возможность его оценки с помощью удельной активности цезия-137 чернобыльского происхождения и морфометрических показателей рельефа.

Основная цель работы – выявление особенностей пространственного распределения удельной активности цезия-137 чернобыльского происхождения (как индикатора смыва серой лесной почвы на распахиваемых склонах в перигляциальной зоне Восточно-Европейской равнины) и сравнительная оценка роли элементов эрозионной сети природного (древние ложбины стока) и природно-антропогенного происхождения (ручьи, сформировавшиеся в результате ливневых дождей вдоль развальных борозд) в формировании смыва почвы.

Интенсивность эрозии идентифицировалась удельной активностью цезия-137 чернобыльского происхождения [Трофимец и др., 2014; 2016; 2017]. Исследовалась возможность установления количественных зависимостей удельной активности цезия-137 чернобыльского происхождения (как индикатора интенсивности смыва почвы) от морфометрических показателей рельефа как для элементов древней эрозионной сети, так и для ручьёв,

сформировавшихся вдоль развальных борозд (не отображаемых на картах), координаты которых устанавливались в процессе полевого обследования с использованием GPS-приёмника.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу работы положены результаты экспериментальных исследований распределения удельной активности почвы по цезию-137, латерального и по глубине. Изучение особенностей пространственной организации эрозионной сети осуществлялось по результатам полевых обследований. Использовались открытые данные дистанционного зондирования Земли: снимки, доступные в Google Earth™, а также снимки WorldView разрешением 0,5 Мп, предоставленные DigitalGlobe Foundation. Описание морфологической структуры рельефа осуществлялось по результатам расчёта и картографирования морфометрических переменных в среде ГИС. Карта площади сбора строилась по методу DEMON [Costa-Cabral, Burges, 1994]. Профильная кривизна рассчитывалась по формуле, предложенной Эвансом [Evans, 1972]. Использовалось программное обеспечение ArcGIS. Радиологический анализ проб почвы производился на УСК «Гамма Плюс».

Задача, поставленная в настоящем исследовании – выяснить, как различается смыв почвы (оцениваемый радиоцезиевым методом) в тальвегах ручьёв, сформировавшихся в развальных бороздах и действующих в период интенсивного стока, и вдоль древних ложбин стока. Из перечисленных эрозионных форм только ложбины можно изучать с помощью морфометрического анализа рельефа. Цифровые модели рельефа могут быть построены по топографическим картам того или иного масштаба. На этих картах могут распознаваться те формы рельефа, которые в данном масштабе отображаются. Формы рельефа, в масштабе карты не отражённые, с помощью ЦМР, вероятнее всего, не могут быть исследованы. Однако их изучение зачастую необходимо. Пояснить эту ситуацию можно на примере современных ручьёв, которые на распахиваемых склонах осуществляют эрозионную деятельность. Ручьи, сформировавшиеся в развальных бороздах и действующие в период интенсивного стока, часто не совпадают с тальвегами древних ложбин. Карты масштаба 1:10 000, используемые в практике землепользования, отображают древние ложбинные формы, но не отображают ручьи, действующие в период интенсивного стока и не совпадающие с тальвегами ложбин [Трофимец и др., 2014, 2017].

Как правило, все ландшафтные исследования, касающиеся пространственного изучения свойств почв, характера растительности и так далее, основаны на анализе закономерностей, исследуемых вдоль катен. Однако в данном случае авторы следовали совету Д.А. Тимофеева [2011] анализировать морфологию склонов вдоль «долинно-балочной сети» (в нашем случае – вдоль ложбинной сети).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В сентябре 2014 года на экспериментальном участке были зафиксированы тальвеги ручьёв, действовавших в период ливневого стока летом текущего года. На спутниковом снимке (рис. 1) видно, что тальвеги ручьёв отличались прямолинейностью. На рис. 3 приведён снимок тальвега такого ручья, который хорошо распознавался по дикоросам в борозде 5 сентября 2014 года. Анализ спутникового снимка от 7 июля 2014 года (рис. 1) позволил предположить, что ручьи сформировались по развальным бороздам. Поле, которое было под паром, в июне 2014 года продисковали; сформировались развальные борозды. Интенсивные осадки 27 июня (рис. 2) сформировали ручьи, тальвеги которых в целом повторили направление развальных борозд (рис. 3).

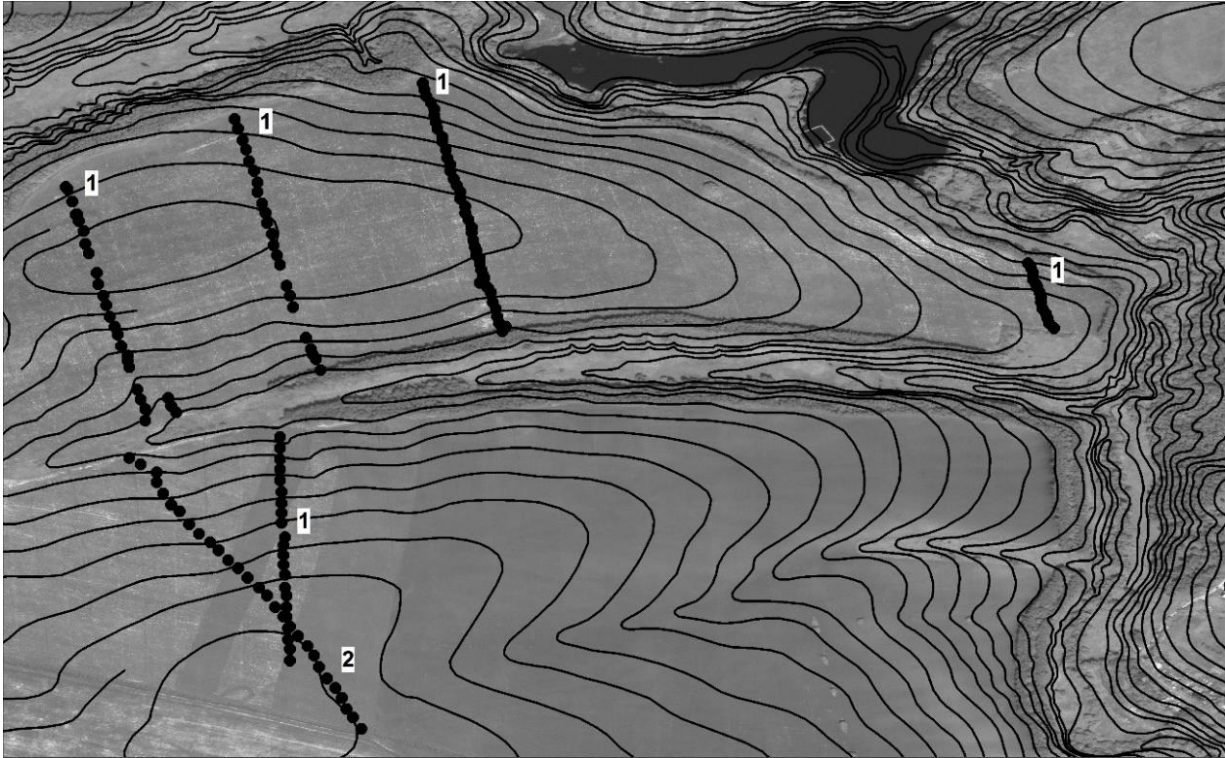


Рис. 1. Спутниковый снимок от 7 июля 2014 года:
 1) точки отбора проб почвы (в сентябре 2014 года и в мае 2015 года)
 в тальвегах ручьёв, сформировавшихся в развальных бороздах;
 2) точки пробоотбора (апрель 2017 года) в тальвеге ручья,
 сформировавшегося в колее от мотоцикла

Fig. 1. A satellite image collected on July 7, 2014:
 1) soil sampling points sampled on September 2014 and May 2015
 in the thalwegs of the streams formed in breakup furrows;
 2) sampling points sampled on April 2017 in the stream thalweg,
 formed in the motorcycle track

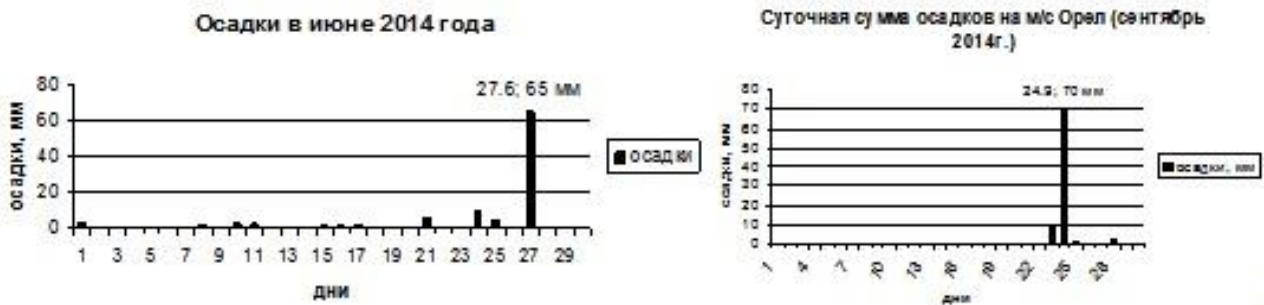


Рис. 2. 27 июня 2014 года за сутки выпало 65 мм осадков
 (при месячной норме 61 мм) – слева,
 9 сентября – 70 мм (при месячной норме 50 мм) – справа
 Fig. 2. June 27, 2014 65 mm of precipitation fell during twenty-four hours
 (monthly rate is 61 mm) – on the left,
 September 9 – 70 mm (monthly rate 50 mm) – on the right



Рис. 3. Развальная борозда (слева), вдоль которой ливень 27 июня 2014 года сформировал ручей, а ливень 29 сентября 2014 года вымыл семена, обусловив разрежение всходов озимых весной 2015 года (снимок справа – от 24 мая 2015 года)

Fig. 3 Breakup furrow (on the left), along which the shower June 27, 2014 formed a stream, and the shower September 29, 2014 washed out the seeds, causing a rarefaction of winter seedlings in spring 2015 (right image – May 24, 2015)



Рис. 4. Диаграммы послойного отбора проб почвы на радиологический анализ в тальвегах ручьёв

Fig. 4. Diagrams of stratified soil sampling for radiological analysis in the stream thalwegs

5 сентября в тальвегах ручьёв (сформировавшихся в период ливня 27 июня 2014 года в развальных бороздах) были отобраны пробы почвы на радиологический анализ (рис. 4). Эти данные позволили получить расчётную зависимость удельной активности цезия-137 для тальвегов ручьёв на склонах северной и южной экспозиций. В настоящей статье обсуждаются возможности расчёта смыва почвы (по удельной активности цезия-137, измеренной в тальвегах ручьёв) в ручьях, сформировавшихся в развальном борозде после ливня 27 июня 2014 года на склоне северной экспозиции.

В 2014 году сентябрь внёс существенные коррективы в процесс. После сева озимых в середине сентября в конце месяца (24 сентября) прошли ливневые дожди, превысившие по интенсивности месячную норму осадков на 37,3 % (рис. 2). Потоки воды вымыли семена вдоль тальвегов ручьёв, и весной следующего года на всходах озимых образовались

«проплешины» (полосы прореженных всходов, рис. 3). Весной 2015 года в тальвегах ручьёв также были обнаружены воронки (рис. 3). Пока не нашло объяснения происхождение этих воронок. На настоящий момент есть предположение, что они сформировались на месте нор грызунов, которые способствовали переводу осадков в подземный сток. В условиях распространения лёссовых пород эти признаки дают основание предполагать обнаружение на экспериментальном полигоне такого явления, как лёссовый псевдокарст [Лаврусевич, 2013].

Чёткая идентификация положения тальвегов ручьёв в мае 2015 года позволила послойно отобрать пробы почвы в ручьях и установить степень смытости почвы в их тальвегах (рис. 4, табл. 1). Следует подчеркнуть, что экстремальность развития эрозии усугубила неправильная вспашка склона (вдоль его падения).

Табл. 1. Смыв почвы в тальвегах ручьёв, сформировавшихся вдоль развальных борозд летом – осенью 2014 года
Table 1. Soil runoff in stream thalwegs formed along the breakup furrows in the summer and autumn of 2014

№ точки	Тип почвы/ величина профильной кривизны*	Активность цезия-137 (Бк/кг), слой почвы 0–20 см	Активность цезия-137, (Бк/кг) в слое глубже 20 см (доля от пол- ного запаса в точке, %)	Смыв почвы в точке, т/га в год
244150	Смытая/-0,003	112,3	37,2 (12 %)	28,8
244151	Сильно смытая/0,002	29,9	0,0 (0 %)	63,8
244152	Сильно смытая/0,002	42,4	13,7 (16,2 %)	58,5
244153	Смытая/-0,0004	82,8	30,8 (4,0 %)	41,3
244154	Смыто- намытая/0,0005	119,0	116,2 (32,8 %)	25,9
244155	Смытая/-0,0002	60,6	6,23 (9,3 %)	50,8
244156	Смытая, деградированная, на водоразделе/0,0004	94,0	36,3 (16,2 %)	36,6
244157	Смытая/0,0005	70,9	6,78 (4,6 %)	30,2

* отрицательные значения профильной кривизны – в зоне аккумуляции, положительные – в зоне смыва

В ходе анализа результатов послойного отбора проб почвы с последующим радиологическим анализом решались две задачи. Первая – установить возможную погрешность определения запаса радиоцезия в тальвеге при условии, что массовый отбор проб почвы по длине тальвега осуществляется из пахотного горизонта (0–20 см) (не из слоя максимального заглубления цезия-137). Вторая – установить, на каких высотных позициях и в каких условиях (в зоне смыва или в зоне аккумуляции) ручей, сформировавшийся в развальной борозде, смывает максимальный объём почвы.

Установление зон смыва и аккумуляции осуществлялось по карте профильной кривизны (рис. 5). В табл. 1 приведены результаты анализа. Все точки послойного отбора проб почвы «попали» в развальные борозды (на разных высотных позициях), то есть можно

считать, что данные табл. 1 могут служить основанием для вывода о смыве почвы в ручьях, сформировавшихся в развальных бороздах. Смыв почвы достаточно большой (28,8–63,8 т/га в год). Наложение точек на слой профильной кривизны позволило сделать вывод о том, что смыв растёт по мере увеличения профильной кривизны. Иначе говоря, ручьи, прорезающие зону аккумуляции (у основания склона или по его простирацию), несколько снижают свою эродирующую функцию. На рис. 6 приведена зависимость, полученная по данным послойного отбора проб почвы.

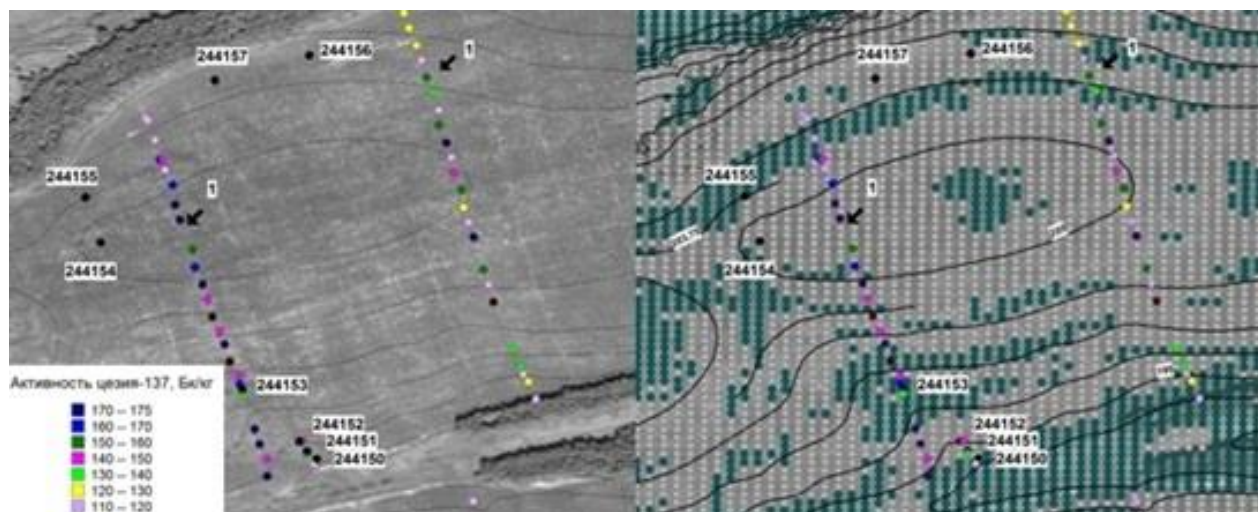


Рис. 5. Расположение точек послойного отбора проб почвы в тальвегах ручьёв, действующих в период ливневого стока:
244155 – номер точки; 1 – ручьи, сформировавшиеся вдоль развальных борозд.
Слева – спутниковый снимок, справа – фрагмент карты профильной кривизны;
склон южной экспозиции

Fig. 5. Positions of the stratified soil sampling points in the thalwegs of the streams existing in the period of storm runoff:
244155 – point number; 1 – streams formed along breakup furrows.
Satellite image on the left; a fragment of the profile curvature map on the right;
the slope has a southern aspect

Несмотря на небольшое количество точек, использованных при построении зависимости смыва почвы в тальвегах ручьёв от профильной кривизны (зависимость слева на рис. 6), тренд очевиден – с увеличением профильной кривизны растёт смыв. Наименьший смыв наблюдается в зоне аккумуляции (в зоне отрицательных значений профильной кривизны) у основания склона южной экспозиции длиной 310 м (точка 244150, смыв 28,8 тонн/га в год). Сравнительно невелик смыв в зоне аккумуляции на водораздельной поверхности склона (этот участок описывают данные точки 244154 (смыв 25,9 тонн/га в год). Немного больше смыв в области деградированных почв на краю поля с малыми уклонами и короткими (длина склона – 160 м) путями смыва (смыв почвы 30,2 и 36,6 т/га в год). Обращают на себя внимание точки 244151 и 244152. Точки расположены у основания склона южной экспозиции, в зоне смыва (профильная кривизна 0,002). На рис. 4 (точка 244151) видно, что из 20 см пахотного горизонта смыто 14 см или 63,8 т/га в год (сильно смытая почва). Этот вывод свидетельствует о необходимости дифференцированного подхода к оценке эрозионной роли развальных борозд на разных участках распаханного склона.

Этот вывод был учтён при построении зависимости активности цезия-137 от площади сбора для склона северной экспозиции (рис. 6).

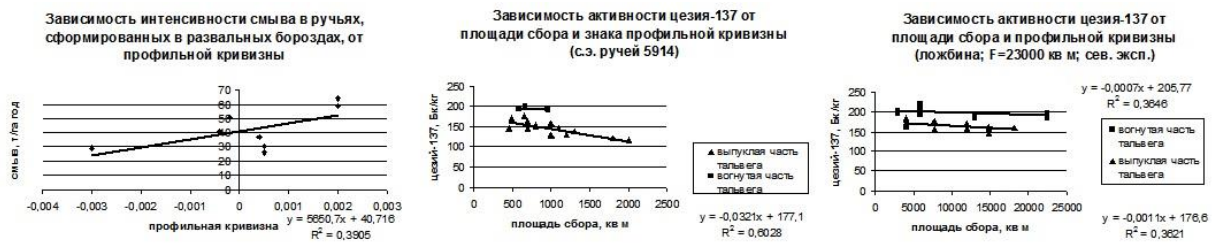


Рис. 6. Зависимость интенсивности смыва почвы в ручьях от знака и величины профильной кривизны – слева; зависимость, полученная для тальвега ручья, сформировавшегося в развальном борозде на склоне северной экспозиции (уравнение приведено для выпуклой части тальвега) – в центре; зависимость, полученная для тальвега древней ложбины стока площадью сбора 23 000 м² на склоне северной экспозиции – справа

Fig. 6. The dependence of the intensity of soil runoff in the streams from the sign and magnitude of the profile curvature – on the left; the dependence obtained for the stream thalweg formed in the breakup furrow on the northern aspect slope (the equation is given for the convex part of the thalweg) – in the center; the dependence obtained for the thalweg of ancient ravine (23 000 m² catchment area) on the northern aspect slope – on the right

Второй важный вывод, который позволяют сделать данные табл. 1, – вывод о том, что неучтённая часть запаса цезия-137 (в слое почвы глубже современного пахотного горизонта, то есть глубже 20 см) невелика и составляет от 4 до 16,2 % (в зоне смытых почв). Лишь в зоне водораздела в области аккумуляции, где почва смыто-намытая, недоучтённая часть запаса цезия-137 составила 32,8 % (точка 244154).

Полученные выводы позволили объяснить вариабельность удельной активности (а значит, и смыва почвы) вдоль ручьёв, сформированных в 2014 году благодаря развальным бороздам. Установлено, что на водораздельной части склона в тальвегах ручьёв удельная активность цезия-137 находится в пределах 160–190 Бк/кг. По мере продвижения к основанию склона активность цезия-137 снижается до менее чем 100 Бк/кг. Для разной длины склона были получены зависимости удельной активности цезия-137 от площади сбора и знака профильной кривизны [Трофимец и др., 2017].

Дискуссионным вопросом является целесообразность учёта ручьёв, сформировавшихся в развальных бороздах и в колеях от автотранспорта на склоне северной экспозиции при разработке методики расчёта смыва почвы (по удельной активности цезия-137) по морфометрическим показателям рельефа. Известно, что эрозионные процессы на склонах северной экспозиции проходят более спокойно, нежели на склонах южной экспозиции. Связано это с растянутым периодом таяния снега. А в рамках настоящего исследования на процесс влияет и форма склона (склон северной экспозиции более пологий) (рис. 1).

Для склона северной экспозиции для ручья, сформированного в развальной борозде, получена расчётная зависимость удельной активности цезия-137 (которая идентифицирует смыв почвы) от площади сбора (зависимость в центре на рис. 6). Анализ зависимости позволил установить, что смыв почвы в области выпуклой части склона больше (активность меньше), чем в области вогнутой части склона (вогнутой части тальвега ручья), где активность цезия больше.

Ранее авторами была получена зависимость удельной активности цезия-137 от площади сбора и знака профильной кривизны для тальвегов древних ложбин стока на склоне северной экспозиции (зависимость справа на рис. 6).

Сравнение удельной активности цезия-137, рассчитанной по зависимости, полученной для ручья, сформировавшегося в развальной борозде (рис. 6) с удельной активностью, рассчитанной при той же площади сбора, но по зависимости, полученной для тальвега древней ложбины стока на склоне северной экспозиции (рис. 6), показало следующее: смыв почвы в ложбине на склоне северной экспозиции практически на всех высотных позициях оказался меньше (удельная активность выше), чем в ручье от развальной борозды. Это значит, что эрозионная активность ручьёв, сформированных в развальных бороздах, выше, и это обстоятельство должно быть учтено при разработке модели формирования смыва почвы на распахиваемых склонах.

На следующем этапе был проведён сравнительный анализ удельной активности почвы в тальвегах ручьёв, сформированных в развальных бороздах в летне-осенний ливневый период, с удельной активностью цезия-137 в тальвегах ручьёв, сформировавшихся весной в колеях от автотранспорта. Колею от мотоцикла (она послужила моделью) позволил обнаружить июльский спутниковый снимок 2010 года. Весной 2017 года подобный след авторы статьи наблюдали 27 апреля. Видимо, по «проторенному» пути из деревни Киреевка в посёлок Стрелецкий жители ездят, год от года несколько меняя траекторию пути.

27 апреля 2017 года было проведено полевое обследование и отобраны пробы почвы на радиологический анализ в тальвеге ручья, сформированного в колее от мотоцикла, на склоне северной экспозиции. Радиологический анализ проб почвы осуществлялся в Центре химизации и сельскохозяйственной радиологии «Орловский» на УСК Гамма плюс. Измерения, произведённые в тальвеге ручья, сформировавшегося в колее от мотоцикла, и на соседней нетронутой поверхности (вдоль катены) и получение расчётных зависимостей (рис. 7) позволили заключить следующее. Удельная активность цезия-137 в тальвеге ручья, сформированного в колее от мотоцикла, может с допустимой погрешностью (20 %) рассчитываться по уравнению, описывающему зависимость активности цезия-137 от площади сбора, полученному по данным точек пробоотбора в катене (то есть на ненарушенной ручейковой эрозией поверхности распахиваемого склона). По данным авторских измерений получено, что при расчёте по оригинальному уравнению отклонение рассчитанных значений от измеренных в 10 % случаев достигает 10–13 % (в остальных случаях меньше 10 %). При расчёте активности цезия-137 по уравнению, полученному для катены, число случаев, превышающих 10 %, несколько больше (15 %). Вывод, казалось бы, очевиден – можно не строить отдельные зависимости для расчёта смыва почвы в колеях от автотранспорта. Однако проведённый анализ повторяемости точек с большим смывом в тальвеге ручья, сформированного в колее и вне колеи, показал следующее. Процент точек с величиной смыва почвы не менее 17 т/га в год (при максимальном измеренном смыве почвы 33 т/га в год) в колее от мотоцикла составил 41,4 %, а на ненарушенной поверхности такой смыв был зафиксирован в 65,5 % случаев. Объяснить это можно следующим образом. В условиях «оплывания» почвы на северном склоне (вследствие постепенного таяния снега весной) уплотнённая почва в днище колеи от автотранспорта выступает локальной зоной аккумуляции смыва с соседних участков (склонов колеи) почвенного материала, что фиксирует повышенная удельная активность цезия-137 в точках пробоотбора в колее по сравнению с ненарушенной поверхностью.

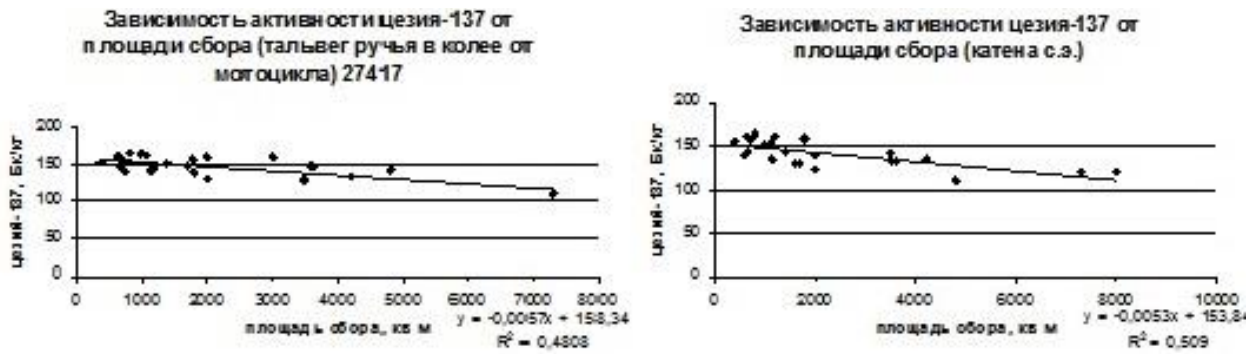


Рис. 7. Зависимости удельной активности цезия-137 от площади сбора, полученные для тальвега ручья, сформировавшегося в колее от мотоцикла (слева) и для соседней, ненарушенной поверхности распаханного склона (справа)
Fig. 7. The dependences between cesium-137 specific activity and catchment area, obtained for the stream thalweg formed in the motorcycle track (on the left) and for the neighboring undisturbed surface of the arable slope (on the right)

На следующем этапе было проведено сравнение активности цезия-137 в колее от мотоцикла (рассчитанной по уравнению на рис. 7) с активностью, рассчитанной при той же площади сбора, но по уравнению, полученному для тальвега ручья, сформированного в развальной борозде летом – осенью во время ливневых осадков (рис. 6). Сравнительный анализ показал, что расчёт смыва почвы для ручья, сформировавшегося в колее от мотоцикла, по уравнению, выведенному для ручьёв, сформированных в развальных бороздах, приводит к завышению смыва в колее более чем на 20 %. В 38,5 % случаев завышение смыва превышает 50 %. Сравнительный анализ, проведённый для древней ложбины стока и для ручья, сформировавшегося в колее от мотоцикла, показал, что смыв почвы в древней ложбине стока на склоне северной экспозиции практически на всех высотных позициях выпуклой части склона (с положительной профильной кривизной в пределах площади сбора, не превышающей 2 000 м²) оказался меньше, чем в ручье, сформированном в колее от автотранспорта. Это неудивительно, так как в ложбине при такой площади сбора энергия потока ещё мала по сравнению с энергией потока в искусственно сформированной молодой эрозионной форме антропогенного происхождения. Таким образом, для ручьёв, сформировавшихся в колеях от автотранспорта, не подходят зависимости, разработанные для древних ложбин стока и для ручьёв, сформированных вдоль развальных борозд.

Проведённый анализ подтвердил необходимость изучения в эксперименте эрозионной активности современных ручьёв природно-антропогенного происхождения и необходимость учёта этих ручьёв в расчётных схемах смыва почвы, которые строятся по морфометрическим характеристикам рельефа.

Из вышесказанного следует, что в расчётной модели необходимо предусмотреть несколько блоков расчётных зависимостей. Первый блок – блок расчётных зависимостей для тальвегов древних ложбин, второй – для тальвегов ручьёв, сформированных вдоль развальных борозд, третий – для ручьёв, сформированных вдоль колеи от автотранспорта.

В заключение следует упомянуть ещё одно исследование степени постоянства ручьёв, формирующихся вдоль развальных борозд. В сентябре 2016 года обследование экспериментального участка не выявило на нераспаханном поле выраженных в рельефе борозд от ручьёв, однако были обнаружены неглубокие понижения вдоль склона (рис. 8). В них были отобраны пробы почвы и сделан радиологический анализ. При наложении точек на спутниковый снимок 2014 года было обнаружено, что точки вдоль понижений (2016 года) практически совпали с положением развальных борозд на спутниковом снимке трёхлетней давности (2014 года). Это говорит о том, что поле распаханное вдоль склона в течение ряда лет,

при этом совпадение эрозионных борозд 2014 и 2016 годов можно объяснить тем, что начинали пахать от одного и того же места. Другими словами, можно предположить, что ежегодная пахота по одному «сценарию» сформировала постоянные эрозионные борозды. В период ливней они давали начало ручьям. В те периоды, когда ливневый сток отсутствовал, на нераспаханном склоне тальвеги ручьёв, действовавших в период ливневого стока, распознавались по характерным продольным углублениям в поверхности склона (точки № 3 на рис. 8). Это обстоятельство позволяет нам утверждать, что произведённые измерения активности цезия-137 в сентябре 2014 года показали смыв почвы, обусловленный ливневыми дождями (как июня, так и сентября 2014 года).

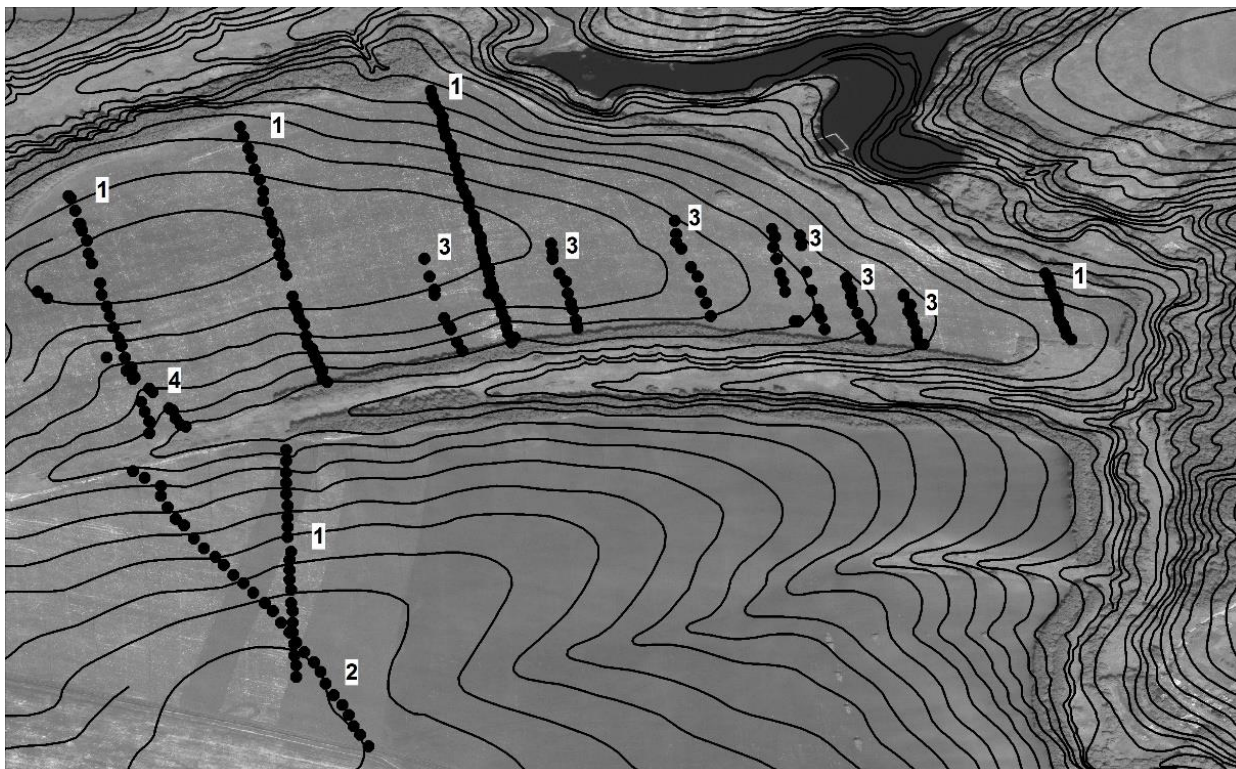


Рис. 8. Спутниковый снимок от 7 июля 2014 года:

- 1) точки пробоотбора в тальвегах ручьёв, сформировавшихся в развальных бороздах;
 - 2) точки в ручье, сформировавшемся в колее от мотоцикла;
 - 3) точки в понижениях рельефа (зафиксированные в сентябре 2016 года), предположительно на месте развальных борозд
- Fig. 8. A satellite image collected on July 7, 2014:
- 1) sampling points in the stream thalwegs formed in the breakup furrows;
 - 2) points in the stream formed in the motorcycle track;
 - 3) points in relief depressions (allocated in September 2016), presumably in the place of the breakup furrows

Измерения 2016 года показывают, как изменилась активность цезия-137 в тальвегах ручьёв, действовавших в период ливневого стока (в 2014 году), за два года (2015 и 2016) без ливневых осадков. В случае если будет обнаружено, что активность цезия-137 в точках на понижениях (№ 3 на рис. 8) уменьшилась (по сравнению с 2014 годом), можно будет констатировать, что весенний сток по тальвегам (в 2015–2016 годах) углублял их (тальвеги) и формировал повышенный смыв почвы. Если смыв окажется меньше (по сравнению с 2014

годом), это будет означать, что в весенний период (2015–2016 годы) интенсивность таяния снега была небольшой, и почва в тальвегах ручьёв «оплывала», аккумулируясь в них и тем самым снижая потери почвы. Эта часть результатов исследований в настоящей статье не рассматривается.

ВЫВОДЫ

Интенсивные ливни (суточная сумма которых по величине сравнима с месячным средним многолетним слоем осадков), выпавшие в период после дискования поля (с июня по сентябрь) формируют в развальных бороздах ручьи, смыв почвы в которых на склоне северной экспозиции превышает смыв почвы в тальвегах древних ложбин (при равных величинах площади сбора). Это превышение в 50 % случаев достигает более чем 20 % (до 50 %). Расчёт по уравнению, выведенному для древних ложбин стока, может считаться приемлемым (для ручьёв, сформировавшихся по развальным бороздам) только для зоны пересечения ручьями ложбин или (на водораздельной поверхности) для участков с отрицательной профильной кривизной (для зон аккумуляции).

В остальных случаях (для участков поля с распространением развальных борозд) необходимо вводить поправочные коэффициенты на уменьшение расчётной активности цезия-137 (рассчитанной по уравнениям, полученным для древних ложбин стока). В противном случае рассчитанный смыв почвы будет существенно занижаться, что исказит реальную картину, и эрозионно опасные участки склона будут считаться неэрозионноопасными.

Смыв в колеях от автотранспорта на склоне северной экспозиции, образовавшихся осенью (и соответственно, сформировавшихся ручьи весной), в преобладающем большинстве случаев меньше, чем на соседней, ненарушенной колеями поверхности склона. Это объясняется аккумуляцией смытой со склонов колеи почвы (в уплотнённом днище колеи) весной, в условиях постепенного таяния снега на склоне северной экспозиции.

Вместе с тем при принятии допустимой погрешности оценки смыва почвы в 20 % можно рекомендовать к расчёту уравнение, полученное для ненарушенной поверхности склона в случае, если поверхность испещрена колеями от мототехники. Однако не следует рассчитывать смыв почвы в колеях от мототехники по уравнению, выведенному для ручьёв, сформировавшихся в развальных бороздах. В этом случае погрешность в сторону завышения смыва почвы может составить более 50 %. Следует особо обратить внимание на участки, где колеи от автотранспорта пересекают древние ложбины стока. На этих участках распахиваемых склонов расчёт смыва почвы может осуществляться по зависимостям, полученным для ложбин стока. В остальных случаях уравнения, построенные для ложбин, использовать не следует.

Важно отметить, что смыв почвы в древней ложбине стока на склоне северной экспозиции практически на всех высотных позициях (кроме тех участков, где ручьи пересекали тальвег ложбины) оказался меньше, чем в ручье, сформированном в развальной борозде, и меньше, чем в ручье, сформировавшемся в колее от автотранспорта. Это подтверждает необходимость изучения в эксперименте эрозионной активности современных ручьёв природно-антропогенного происхождения и обязательного учёта их в расчётных схемах смыва почвы, которые строятся по морфометрическим характеристикам рельефа.

Исследования пространственно-временной эрозионной активности распахиваемых склонов возможны при условии использования дистанционных методов, полевых обследований, сопровождаемых GPS-съёмкой, радиоцезиевого метода (позволяющего в точке оценивать потери почвы), ГИС-анализа с расчётом морфометрических показателей рельефа. Наилучшим образом описывают влияние рельефа на формирование смыва почвы такие морфометрические показатели, как площадь сбора и профильная кривизна.

БЛАГОДАРНОСТИ

Использованные спутниковые снимки предоставлены DigitalGlobe Foundation.

ACKNOWLEDGEMENTS

Used satellite images provided of the DigitalGlobe Foundation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Голосов В.Н.* Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М.: ГЕОС, 2006. 296 с.
2. *Жидкин А.П., Голосов В.Н., Светличный А.А., Пяткова А.В.* Количественная оценка перераспределения наносов на пахотных склонах на основе использования полевых методов и математических моделей. *Геоморфология*, 2015. № 2. С. 41–53. DOI: 10.15356/0435-4281-2015-2-41-53.
3. *Лаврусевич А.А.* Научно-методические основы изучения и оценки лёссового псевдокарста в условиях техногенеза. Дисс. на соиск. учёной степ. д. г-м. наук. М.: Всерос. науч.-исслед. ин-т минерал. сырья им. Н.М. Федоровского, 2013. 256 с.
4. *Линник В.Г.* Ландшафтная дифференциация техногенных радионуклидов: геоинформационные системы и модели. Дисс. на соиск. учёной степ. д. г. наук. М.: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2008. 305 с.
5. *Маркелов М.В.* Современные эрозионно-аккумулятивные процессы в верхних звеньях гидрографической сети лесной и лесостепной зон. Автореферат канд. дисс. Москва: Институт географии РАН, 2004. 26 с.
6. *Тимофеев Д.А.* Геоморфологические и палеогеографические аспекты проблемы эрозии почв. Размышления о фундаментальных проблемах геоморфологии. *Избранные труды*. М.: Медиа-ПРЕСС, 2011. С. 298–304.
7. *Трофимец Л.Н., Паниди Е.А.* Методические подходы к применению радиоцезиевого метода при изучении смыва и аккумуляции на пахотных склонах, осложненных ложбинным мезо- и микрорельефом. *Проблемы региональной экологии*, 2014. № 4. С. 147–152.
8. *Трофимец Л.Н., Паниди Е.А.* Методы геоморфометрии, дистанционного зондирования и ГИС при изучении распределения радионуклида ⁴⁰K в почве распахиваемых склонов, осложнённых ложбинной сетью. *ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф. Протвино*, 2016. Т. 22. Ч. 1. С. 183–189. DOI:10.24057/2414-9179-2016-1-22-183-189.
9. *Трофимец Л.Н., Паниди Е.А., Иванёха Т.Л., Петелько А.И.* Оценка эрозионной активности ложбинного комплекса распахиваемых склонов. *ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф. М.: Издательство МГУ*, 2017. Т. 23. Ч. 1. С. 323–332. DOI:10.24057/2414-9179-2017-1-23-323-332.
10. *Шарый П.А.* Оценка взаимосвязей рельеф-почва-растения с использованием новых методов в геоморфометрии. Автореферат канд. дис. Тольятти: Институт экологии Волжского бассейна РАН, 2005. 25 с.
11. *Costa-Cabral M.C., Burges S.J.* Digital Elevation Model Networks (DEMON): a model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research*, 1994. V. 30. Iss. 6. P. 1681–1692. DOI:10.1029/93WR03512.
12. *Evans L.S.* General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. *Spatial analysis in geomorphology*. London: Methuen & Co. Ltd., 1972. P. 17–90.
13. *Ferro V., Di Stefano C., Giordano G., Rizzo S.* Sediment delivery processes and spatial distribution of caesium-137 in a small Sicilian basin. *Hydrological Processes*, 1998. № 12 (5). P. 701–711.
14. *Fulajtar E.* Assessment of soil erosion on arable land using ¹³⁷Cs measurements: a case study from Jaslovske Bohunice, Slovakia. *Soil and Tillage Research*, 2003. № 69 (1–2). P. 139–152.
15. *Owens Ph.N., Walling D.E.* Spatial variability of Caesium-137 inventories at reference sites: an example from two contrasting sites in England and Zimbabwe. *Applied Radiation and Isotopes*, 1996. V. 47. Iss. 7. P. 699–707.

REFERENCES

1. *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.
2. *Evans L.S.* General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. *Spatial analysis in geomorphology*. London: Methuen & Co. Ltd., 1972. P. 17–90.
3. *Ferro V., Di Stefano C., Giordano G., Rizzo S.* Sediment delivery processes and spatial distribution of caesium-137 in a small Sicilian basin. *Hydrological Processes*, 1998. No 12 (5). P. 701–711.
4. *Fulajtar E.* Assessment of soil erosion on arable land using ¹³⁷Cs measurements: a case study from Jaslovske Bohunice, Slovakia. *Soil and Tillage Research*, 2003. No 69 (1–2). P. 139–152.
5. *Golosov V.N.* Erosion-accumulative processes in river basins of the mastered plains. Moscow: GEOS, 2006. 296 p. (in Russian).
6. *Lavrusevich A.A.* Scientific-methodological basis of study and evaluation of loess pseudokarst in the conditions of technogenesis. Diss. for the degree of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences. Moscow: All-Russian scientific research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky, 2013. 256 p. (in Russian).
7. *Linnik V.G.* Landscape differentiation of technogenic radionuclides: geographical information systems and models. Diss. for the degree of Doctor of Geographical Sciences. Moscow: Moscow State University named after M.V. Lomonosov, 2008. 305 p. (in Russian).
8. *Markelov M.V.* Modern erosion-accumulative processes in the upper parts of the hydrographic network of forest and forest-steppe zones. Abstract of PhD dissertation. Moscow: Institute of Geography of RAS, 2004. 26 p. (in Russian).
9. *Owens Ph.N., Walling D.E.* Spatial variability of Caesium-137 inventories at reference sites: an example from two contrasting sites in England and Zimbabwe. *Applied Radiation and Isotopes*, 1996. V. 47. Iss. 7. P. 699–707.
10. *Sharyi P.A.* Evaluation of relief-soil-plant relationships using new methods of geomorphometry. Abstract of PhD dissertation. Tolyatti: Institute of Ecology of the Volga Basin of RAS, 2005. 25 p. (in Russian).
11. *Timofeev D.A.* Geomorphological and paleogeographic aspects of soil erosion problem. Reflections on the fundamental problems of geomorphology. Selected works. Moscow: Media-PRESS, 2011. P. 298–304 (in Russian).
12. *Trofimetz L.N., Panidi E.A.* Methodological approaches to the application of radiocaesium method in the study of runoff and accumulation on the arable slopes, complicated with ravine meso- and microrelief. *Problems of Regional Ecology*, 2014. No 4. P. 147–152 (in Russian).
13. *Trofimetz L.N., Panidi E.A.* Methods of the geomorphometry, remote sensing and GIS in study of the ⁴⁰K radionuclide distribution in soil of arable slopes, complicated with erosion network. *InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International conference*. Protvino, 2016. V. 22. Part 1. P. 183–189. DOI:10.24057/2414-9179-2016-1-22-183-189 (in Russian, abs English).
14. *Trofimetz L.N., Panidi E.A., Ivanekha T.L., Petel'ko A.I.* Estimation of erosion activity in the ravine complex of arable slopes. *InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International conference*. Moscow: Moscow University Press, 2017. V. 23. Part 1. P. 323–332. DOI:10.24057/2414-9179-2017-1-23-323-332 (in Russian, abs English).
15. *Zhidkin A.P., Golosov V.N., Svetlichnyi A.A., Pyatkova A.V.* Quantitative assessment of sediment redistribution on arable slopes using in-situ techniques and computational models. *Geomorphology*, 2015. No 2. P. 41–53. DOI:10.15356/0435-4281-2015-2-41-53 (in Russian).