Трофимец Л.Н.¹, Паниди Е.А.², Кочуров Б.И.³, Иванеха Т.Л.⁴, Петелько А.И.⁵

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЦЕЗИЯ-137
ЧЕРНОБЫЛЬСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ КАК ИДЕНТИФИКАТОРА
ПОТЕРИ ПОЧВОЙ ПИТАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ
(ПОДВИЖНОГО ФОСФОРА) ВСЛЕДСТВИЕ ЭРОЗИИ**

АННОТАЦИЯ

В работе излагаются результаты поиска количественных зависимостей содержания подвижного фосфора от величины удельной активности цезия-137 (как индикатора интенсивности эрозионных процессов за период с 1986 г.). В основу математической модели зависимостей положены материалы тахеометрической съемки и отбора проб почвы весной 2016 г. в 200 точках на экспериментальном полигоне в пределах распаханного склона в бассейне р. Сухой Орлицы (бассейн верхней Оки). Использование спутниковых снимков сверхвысокого пространственного разрешения и карт морфометрических характеристик рельефа, рассчитанных средствами ГИС, позволили объяснить выявленные общие закономерности в распределении подвижного фосфора, гумуса и удельной активности цезия-137 на склоновой поверхности.

Получена статистически значимая зависимость содержания подвижного фосфора от удельной активности цезия-137 для сравнительно плоской водораздельной поверхности распаханного склона с элементами полигонально-блочного микрорельефа. В тальвегах микроручьев на склоне (в зоне вогнутой части склона южной экспозиции, у его основания) обнаружено, что при низких, обусловленных смывом, значениях удельной активности цезия-137 содержание подвижного фосфора в измеряемой точке высокое. Такое положение объясняется особенностями распределения как подвижного фосфора, так и гумуса по почвенному профилю. Второй гумусовый горизонт пополняет пахотный горизонт на участках смытых почв (в тальвегах ручьев) подвижным фосфором органического происхождения. Этот вывод позволяет судить о том, что использование активности цезия-137 при изучении влияния смыва на фосфатное состояние серых лесных почв склоновых агроландшафтов имеет определенные ограничения для тальвегов эрозионных форм. В заключительной части сделан вывод о необходимости проведения дополнительных исследований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ложбины, смыв, полигонально-блочный микрорельеф, тальвег ручья, ГИС, спутниковые снимки, цезий-137 чернобыльского происхождения, гумус, подвижный фосфор.

---

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

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

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

⁴ Центр химизации и сельскохозяйственной радиологии «Орловский», ул. Молодежная, д. 7, 302502, пос. Стрелецкий, Орловский район, Россия, *e-mail*: ivaneha.taras@gmail.com

⁵ Новосильская ЗАГЛОС, ул. Семашко, 2а, 303035, Мценск, Россия, *e-mail*: zaglos@mail.ru

**Lyubov N. Trofimetz¹, Evgeny A. Panidi², Boris I. Kochurov³, Taras L. Ivaneha⁴,
Anatoly I. Petelko⁵**

**ASSESSMENT OF THE POSSIBILITIES
OF CHERNOBYL ORIGIN CESIUM-137 USE AS AN SOIL NUTRIENTS
(MOVABLE PHOSPHORUS) LOSS DUE TO EROSION**

ABSTRACT

The paper presents results estimation of quantitative dependences between amount of movable phosphorus and specific activity of cesium-137 (which can be used indicator of the erosion processes intensity in the period since 1986). The mathematical model of the dependencies is based upon the data of topographic survey and soil sampling in the spring of 2016 (200 sampling points were used on the experimental area within the arable slope, in the basin of Suhaya Orlitsa river that is part of the basin of upper Oka river). The very high spatial resolution satellite imagery and maps of morphometric characteristics of the microrelief (produced by means of GIS) allowed to explain the revealed general dependences between the distribution of movable phosphorus, humus and specific activity of cesium-137 in soil material on the slope surface.

The statistically significant dependence between the amount of movable phosphorus and the specific activity of cesium-137 was obtained for a relatively flat watershed surface of the arable slope complicated with elements of polygonal-block microrelief. It was found out that low (due to runoff) values of cesium-137 specific activity correspond to the high amounts of movable phosphorus in the thalwegs of micro streams on the concave part of the southern exposure slope at the down part of the slope. This situation can be explained by the features of the distribution of both movable phosphorus and humus along the soil profile. The second humus horizon replenish the arable horizon in areas of washed out soil (in the thalwegs of streams) with phosphorus of organic origin. This conclusion means that the use of cesium-137 activity in the study of soil runoff impact onto the phosphate status of gray forest soils on the slope agrolandscapes has some limitations in the case of the thalwegs of erosion forms. The final part of the paper concludes that additional research is needed.

KEYWORDS: Ravines, Soil Runoff, Polygonal-block Microrelief, Stream Thalweg, GIS, Satellite Imagery, Chernobyl Origin Cesium-137, Humus, Movable Phosphorus.

ВВЕДЕНИЕ

Эрозионные процессы являются как фактором, снижающим плодородие почв, так и, одновременно, фактором, перераспределяющим привнесенные в почву (с целью улучшения ее плодородия) химические компоненты. Изучение воздействия эрозии на свойства пахотных почв и количественная оценка этого воздействия в разных элементах рельефа – непереносимое условие сбалансированного ведения земледелия, в том числе, при внедрении принципов прецизионного земледелия. Изучение эрозии на территориях, географически

---

¹ Orel State University named after I.S. Turgenev, Faculty of Natural Sciences, Department of Geography, Komso-molskaya str., 95, 302026, Orel, Russia, *e-mail:* trofimetc_l_n@mail.ru

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

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

⁴ Center of Chemicalization and Agricultural Radiology "Orlovsky", Molodezhnaya str., 7, 302502, Orel, Russia, *e-mail:* ivaneha.taras@gmail.com

⁵ Novosilskaya ZAGLOS, Semashko str., 2a, 303035, Mtsensk, Russia, *e-mail:* zaglos@mail.ru

находящихся в перигляциальной зоне, неизбежно требует укрупнения масштаба исследований. Это обусловлено особенностями строения поверхности. Водораздельные поверхности в перигляциальной зоне северной лесостепи в пределах Восточно-Европейской равнины осложнены элементами полигонально-блочного микрорельефа [Марусова, 2005; Алифанов и др., 2010]. Склоновые поверхности экспериментального полигона нарушены ложбинными эрозионными формами, к которым присоединяются эрозионные формы природно-антропогенного происхождения (ручьи, формирующиеся по колеям от сельхозтехники и существующие в период высокого стока). Несмотря на неоднозначное отношение исследователей к выявлению элементов полигонально-блочного рельефа на изучаемой территории [Шарый, 2005], эти формы на спутниковых снимках сверхвысокого пространственного разрешения просматриваются (рис. 1), следовательно, их учет в схемах расчета эрозии необходим. В наших исследованиях обнаружено, что на водораздельных поверхностях размеры блоков изменяются от 15 до 30 м. Межблочные понижения имеют ширину от 2 до 20 м [Трофимец, Паниди, 2014]. Превышения блоков над межблочьями – от 30 до 100 см. Длины как древовидных, так субпараллельных ложбин [Еременко, 2009] оцениваются в первые сотни метров. Глубина – от 60–100 см до 2,5 м. Изучение смыва почвы в таких ландшафтных условиях возможно только при условии применения комплекса методов [Трофимец, Паниди, 2016; Трофимец и др., 2017]. В исследовании использовались следующие методы: почвенно-морфологический (при назначении опорного значения удельной активности цезия-137), тахеометрическая съемка (для описания в крупном масштабе рельефа экспериментального участка), радиоцезиевый метод (для определения смыва почвы в точке), дистанционные методы (при установлении местоположения элементов полигонально-блочного, ложбинного рельефа и современных ручьев природно-антропогенного происхождения), ГИС (при изучении возможностей количественного описания рельефа с целью получения зависимостей почвенных свойств от удельной активности цезия-137 как индикатора смыва почвы в точке пробоотбора).

Основная цель работы – выявление пространственных закономерностей распределения некоторых показателей почвенного плодородия (исследовалось фосфатное и, частично, гумусное состояние серых лесных пахотных почв) в связи с проявлением эрозии в условиях полигонально-блочного и ложбинного рельефа. Интенсивность эрозии идентифицировалась удельной активностью цезия-137 чернобыльского происхождения [Маркелов, 2004; Голосов, 2006]. В связи с этим, исследовалась возможность установления количественных зависимостей содержания подвижного фосфора (как показателя продуктивности почвы) от удельной активности цезия-137 чернобыльского происхождения (как индикатора интенсивности эрозии).

Объект исследования – серые лесные пахотные почвы на распаханном склоне южной экспозиции в бассейне р. Сухой Орлицы (бассейн верхней Оки).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу работы положены результаты экспериментальных исследований распределения (латерального и по глубине) удельной активности почвы по цезию-137, гумусу и подвижному фосфору. Гумусное и фосфатное состояние почвы оценивалось в точках пробоотбора весной 2016 г. при проведении тахеометрической съемки. Съемка выполнялась в масштабе 1 : 500. На необходимость крупномасштабных исследований «поперечной дифференцированности процессов смыва, размыва, аккумуляции», которая выявляется не при изучении почвенно-геоморфологических профилей (катен), а при анализе морфологии склонов вдоль долинно-балочной сети, указывал Д.А. Тимофеев [Тимофеев, 2011]. Многие ученые [Степанов, 1995; Марусова, 2005; Алифанов и др., 2010] исследо-

вали почвенные свойства в связи с микрорельефом перигляциальных областей, которые отличаются названной Д.А. Тимофеевым «поперечной дифференцированностью». Свойства цезия-137 как индикатора интенсивности смыва почвы изучались многими исследователями как отечественными, так зарубежными [Owens, Walling, 1996; Голосов, 2000, Fulajtar, 2003; Маркелов, 2005]. В настоящей статье делается попытка ответить на вопрос, возможно ли с помощью такого индикатора смытых почв как цезий-137 чернобыльского происхождения, оценивать влияние эрозионных процессов на некоторые показатели продуктивности серых лесных почв (в частности, на содержание подвижного фосфора в современном пахотном горизонте).

В работе использованы спутниковые снимки сверхвысокого пространственного разрешения, предоставленные DigitalGlobe Foundation. Описание морфологической структуры рельефа осуществлялось по данным расчета и картографирования морфометрических переменных в среде ГИС. Карта площади водосбора была построена по методу DEMON [Costa-Cabral, Burges, 1994]. Профильная кривизна рассчитывалась по формуле, предложенной Эвансом [Evans, 1972]. Для обработки данных и построения морфометрических карт использовалось программное обеспечение ArcGIS. Радиологический анализ проб почвы производился на УСК «Гамма Плюс» (радиоцезиевый метод).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Отбор проб почвы в горизонте 0–25 см в мае 2016 г., во время проведения тахеометрической съемки на склоне южной экспозиции в бассейне р. Сухой Орлицы Орловского района Орловской области и определение в образцах удельной активности цезия-137, гумуса, подвижного фосфора P_2O_5 позволили обобщить полученные результаты в виде карт, построенных в среде ГИС. В распределении P_2O_5 на распахиваемом склоне можно выделить как минимум пять зон (рис. 1).

Зона 1 – зона транзита на склоне смежной балки (склон северной экспозиции смежной балки). Профильная кривизна в этой зоне положительная или слабоотрицательная (не менее $-0,0002$), что свидетельствует о преобладании смыва над аккумуляцией. Зона 2 – водораздельная поверхность. Профильная кривизна положительная или слабоотрицательная. Зона 3 – зона транзита. Профильная кривизна положительная или слабоотрицательная. Зона 4 – зона аккумуляции. Профильная кривизна отрицательная (менее $-0,0002$). Между зонами 4 и 5 – зона транзита. Профильная кривизна в промежуточной зоне преимущественно положительная, что говорит о преобладании смыва над аккумуляцией. Зона 5 – зона аккумуляции у основания склона южной экспозиции. Профильная кривизна отрицательная (менее $-0,0002$).

Обнаружены следующие особенности в распределении подвижного фосфора. На склоне северной экспозиции смежной балки (крайняя трансекта у лесополосы на рис. 2) подвижный фосфор имеет повышенную вариабельность (от 6,6 до 9,3 мг/100 г) при выраженной тенденции к сниженным значениям (таблица). Объяснить низкие значения подвижного фосфора можно интенсивной распашкой сравнительно плоской поверхности у края дороги, идущей вдоль поля и выносом питательных веществ с урожаем. Анализ карты низких (менее 4 %) значений гумуса в пахотном слое 0–25 см (рис. 2) показал, что к этой зоне приурочена и зона низких значений подвижного фосфора.

На рис. 2 видно, что не только на водораздельном участке распахиваемого склона, но и на межложбинных водоразделах содержание гумуса и подвижного фосфора пониженное. Объяснить пониженные запасы питательных веществ на межложбинных водоразделах можно теми же причинами (более интенсивной распашкой и выносом веществ с урожаем).

Рис. 1. Зоны, выделенные по содержанию подвижного фосфора в пахотном горизонте (слева, поверх спутникового снимка); На водораздельной поверхности видны светлые полигоны – блочные повышения и темные межблочные понижения.

Темные полосы вдоль простираия склона – древние ложбины стока;

Справа – фрагмент карты профильной кривизны

Fig. 1. Zones separated due to the content of movable phosphorus in the arable horizon (on the left), satellite image on the background; Light blocks and dark interblock depressions are visible on the watershed surface; Dark stripe along the slope are the ancient ravines.

The fragment of profile curvature map on the right

Причину вариабельности значений подвижного фосфора в пахотном горизонте следует искать во влиянии эрозионного расчленения поверхности. На тех участках склона, где поверхность нарушена эрозионной сетью (что хорошо видно на спутниковом снимке и на карте площади водосбора на рис. 4), наблюдается большая вариабельность содержания в почве подвижного фосфора. Это отмечено, в частности, на крайней трансекте (на краю поля, у дороги). Здесь поверхность испещрена короткими микроложбинами (рис. 4). На карте площади водосбора ложбины изображены темными извилистыми линиями. При движении к линии водораздела (к зоне 2) увеличивается содержание в почве подвижного фосфора (трансекта в зоне 1 на рис. 3). Здесь, как видно на карте площади водосбора (рис. 4), поверхность изрезана лишь верхними звеньями микроложбин, еще неглубокими, слабо выраженными в рельефе. Смыв почвы небольшой. Содержание подвижного фосфора в почве более высокое (выше 8 мг/100 г) в сравнении с трансектой на краю поля (6,6–7,4 мг/100 г). При приближении к линии водораздела содержание подвижного фосфора в почве вновь снижается до 8 мг/100 г и менее (в пределах 2 зоны). Вдоль трансекты в зоне 2 на рис. 3 выделяется явно выраженная «полоса» сниженных (менее 8 мг/100 г) значений подвижного фосфора. На карте площади водосбора это место водораздела характеризуется практически полным отсутствием эрозионных борозд. Именно здесь распашка и вынос с урожаем питательных веществ особенно сильно влияют на снижение запаса в пахотном горизонте и гумуса и подвижного фосфора.

Рис. 2. Слева – распределение подвижного фосфора в точках пробоотбора, справа – распределение низких значений содержания гумуса в почве (содержание гумуса не более 4 %)
Fig. 2. On the left – distribution of movable phosphorus at the sampling points, on the right – distribution of low values of humus content in the soil (humus content is not more than 4 %)

Рис. 3. Распределение подвижного фосфора в почве вдоль трансект на спутниковом снимке (слева) и на карте профильной кривизны (справа); 1, 2, 3, 4, 5 – зоны, отличающиеся по особенностям распределения подвижного фосфора
Fig. 3. Distribution of movable phosphorus in the soil material along the transects, above the satellite image (on the left) and above the profile curvature map (on the right); 1, 2, 3, 4, 5 – areas differing accordingly to the distribution of movable phosphorus

Следом за водораздельной поверхностью, на склоне южной экспозиции (в зоне 3) – вновь возникает полоса большой вариабельности подвижного фосфора (содержание фосфора – от 7,3 до 20,1 мг/100 г), что связано с эрозионной деятельностью ложбин. Наконец, на высотной позиции 197,5 м располагается полоса повышенных (до более чем 20 мг/100 г) значений подвижного фосфора (зона 4 на рис. 3). Зона 4, как видно на карте профильной кривизны, приурочена к участку низких (менее $-0,0002$) значений профильной кривизны, т. е., налицо преобладание аккумуляции над смывом. Кроме того, этот участок расположен перед резким сужением ложбины (что хорошо просматривается на карте площади водосбора на рис. 4). Здесь формируется, видимо, своеобразная зона подпора, где накапливается смытая с вышерасположенных участков почва, обогащенная подвижным фосфором. Для этой зоны отмечается и повышенные значения удельной активности цезия-137 (рис. 4).

Рис. 4. Значения подвижного фосфора в точках вдоль трансекта на карте площади водосбора (слева); Карта построена по материалам тахеометрической съемки 2016 г.; Справа – распределение значений удельной активности цезия-137 в пахотном горизонте (приведены только те точки, в которых значения активности превышают 140 Бк/кг)

Fig. 4. Values of movable phosphorus along the transect on the catchment area map (on the left); The Map is based on the data of topographic survey made on 2016; On the right – the distribution of values of specific activity of the cesium-137 in the arable horizon (only the points where the activity exceeds 140 Bq/kg are shown)

Наконец, у основания склона вновь отмечается полоса повышенных (не менее 10 мг/100 г) значений подвижного фосфора (трансекта в зоне 5 на рис. 3). Карта профильной кривизны позволяет констатировать здесь низкие (по величине, ниже $-0,0002$) значения профильной кривизны рельефа, что свидетельствует о том, что участок расположен в зоне аккумуляции. Вместе с тем участок пересечен множеством микроложбин, что хорошо видно на спутниковом снимке и на карте площади водосбора на рис. 4. Это обуславливает в целом некоторое снижение содержания подвижного фосфора (по сравнению с зоной 4) за счет смыва почвы в тальвегах микроложбин. На этом участке снижены значения удельной активности цезия-137 (спутниковый снимок на рис. 4). Лишь в четырех точках активность цезия-137 превысила 140 Бк/кг.

Для выделенных характерных зон (и приуроченных к ним трансект) были построены зависимости подвижного фосфора от удельной активности цезия-137.

Далее приведены две характерные зависимости (рис. 5). Одна построена для водораздельной поверхности (слева на рис. 5). Другая построена для зоны аккумуляции 4 (справа на рис. 5). Следует заметить, что зависимости, построенные для области склоновой поверхности, характеризуются невысокой степенью тесноты статистической связи (коэффициенты корреляции изменяются от минус 0,51 до минус 0,55). Объяснить это можно сложным характером распределения по глубине почвенных свойств серых лесных почв [Марусова, 2005].

Рис. 5. Зависимость содержания подвижного фосфора от удельной активности цезия-137 в пахотном горизонте; Слева – водораздельная поверхность, зона 2;

Справа – зона 5 в области аккумуляции у основания склона

Fig. 5. The dependence of the movable phosphorus content in the soil material from the specific activity of cesium-137 in the arable horizon; On the left – watershed surface, zone 2; On the right – zone 5, accumulation area at the lower part of the slope

Диаграммы на рис. 6 показывают особенности распределения по глубине удельной активности цезия-137, гумуса и подвижного фосфора в смытых почвах. Смытая до 10 см почва в точке 102.5, приуроченной к тальвегу распахиваемой ложбины (это диагностируется по удельной активности цезия-137), имеет высокое содержание гумуса по всему профилю почвы (от 5,3 % у поверхности до 5,8 % на глубине). Объясняется это наличием второго гумусового горизонта, расположенного глубже плужной подошвы (глубже 30 см), до которой производилась распашка в СССР до 1990 г. [Марусова, 2005]. Содержание подвижного фосфора с глубиной несколько снижается (с 8 мг/100 г в современном пахотном горизонте до 6 мг/100 г на глубине ниже плужной подошвы). Снижение содержания подвижного фосфора по глубине позволяет предположить, что в случае смыва верхних слоев почвы и припахивания более глубоких, обедненных подвижным фосфором горизонтов, в исследуемом пахотном горизонте содержание подвижного фосфора должно снижаться. Следовательно, можно ожидать прямой зависимости между величиной удельной активности цезия-137 и содержанием подвижного фосфора. На деле ситуация оказалась сложнее.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 5, показал, что для водораздельной поверхности характерно, как уже упоминалось, пониженное содержание подвижного фосфора (не более 8 мг/100 г). При этом содержание P_2O_5 увеличивается на участках с повышенной удельной активностью цезия-137. Можно предполагать, что в условиях интенсивной распашки на водораздельной поверхности, испещренной лишь чередованием блоков и межблочных понижений с перепадом высот до 100 см, смыв небольшой, и содержание питательных веществ (в том числе подвижного фосфора) в почве увеличивается в зонах

аккумуляции в микропонижениях. Цезий-137 также показывает повышенные значения в миропонижениях с несмытыми или слабонамытыми почвами. Зависимость удельной активности и подвижного фосфора в пахотном горизонте на водораздельной поверхности прямая, характеризуется коэффициентом корреляции 0,7 (трансекта 14516.6 в зоне 2 на рис. 5). На склоновой поверхности зависимости носят, по-преимуществу, обратный характер (трансекта 14516.20 в зоне 5 на рис. 5).

Анализ зависимости, полученной для трансекты 14516.20, показал следующее. В нижней части склона, в зоне аккумуляции (трансекта 14516.20 в зоне 5 на рис. 3 и 4), где в целом содержание подвижного фосфора повышено (11,5–13,5 мг/100 г), удельная активность цезия-137 также повышена до 151,2–161,4 Бк/кг (рис. 4). Вместе с тем замечено, что в точках, приуроченных к тальвегам ручьев (в зоне 5) со смытыми почвами (смытость почв диагностируется по низкой удельной активности цезия, составляющей от 137 до менее 125 Бк/кг), содержание подвижного фосфора достаточно высокое (12,4–13,5 мг/100 г). Объяснить этот факт можно тем, что в тальвегах ручьев на содержании подвижного фосфора сказывается влияние второго гумусового горизонта. Известно, что во всякой почве имеются органические и минеральные соединения фосфорной кислоты. В серых лесных почвах органические фосфаты составляют 44 % всего почвенного фосфора, минеральные – 56 %. Вероятно, в тальвегах микроручьев, прорезающих зону аккумуляции, обогащенную органикой (содержание гумуса вдоль трансекты от 4,2 до 5,6 %), в точках со смытым пахотным горизонтом (и, соответственно, с низкими значениями удельной активности цезия-137) повышенное содержание подвижного фосфора обеспечивается за счет органических соединений фосфорной кислоты, содержащихся в припахиваемом слое подпахотного горизонта.

Рис. 6. Распределение цезия-137 (слева), гумуса (в центре) и подвижного фосфора (справа) по глубине в смытой почве, в тальвеге распахиваемой ложбины

Fig. 6. Distribution of cesium-137 (on the left), humus (in the center) and movable phosphorus (on the right) in the profile of washed out soil, on the thalweg of arable ravine

Содержание подвижного фосфора в почве
(в % от общего числа точек отбора проб, в пределах выделенных зон – 1–5)
Amount of the movable phosphorus in the soil material
(% of the total number of sampling points, within the allocated zones – 1–5)

№ трансекты	Диапазоны содержания подвижного фосфора, мг/100г				Положение на склоне (номер зоны)
	До 8	8–10	10–15	15–22	
14516.3	10	90	—	—	Зона транзита (1)
14516.6	100	—	—	—	Водораздел (2)
14516.15	10	20	10	60	Зона аккумуляции (4)
14516.20	—	10	90	—	Зона аккумуляции у основания склона (5)

ВЫВОДЫ

Исследования показали, что хорошо объяснить общий характер и особенности латерального распределения подвижного фосфора в условиях выпукло-вогнутой формы пахотного склона позволяют карты площади водосбора и профильной кривизны. Обнаружено, что повышенные значения подвижного фосфора приурочены к зонам аккумуляции, идентифицируемым отрицательными значениями профильной кривизны. Вариабельность фосфатного состояния серых лесных почв хорошо описывается картой площади водосбора, на которой максимальные значения площади водосбора совпадают с положением тальвегов ложбин стока. В области водораздельных пространств с элементами полигонально-блочного микрорельефа (в перигляциальных областях Восточно-Европейской равнины) удельная активность цезия-137 в пахотном горизонте (как показатель смыва почвы) может успешно использоваться для изучения влияния эрозионных процессов на фосфатное состояние серых лесных пахотных почв. В работе получена статистически значимая зависимость содержания подвижного фосфора от удельной активности цезия-137 для водораздельной поверхности распаханного склона с элементами полигонально-блочного микрорельефа.

Сложность получения расчетных зависимостей фосфатного состояния серых лесных почв от интенсивности эрозионного процесса, идентифицируемого удельной активностью цезия-137, для склоновой поверхности, испещренной микроложбинами, заключается в том, что на старопашотных почвах фосфатное и гумусное состояние почв в тальвегах микроручьев со смытыми почвами обуславливается влиянием второго гумусового горизонта. В этом горизонте удельная активность цезия-137 низка, а содержание гумуса и подвижного фосфора или не снижены, или снижены незначительно. Повышенное содержание подвижного фосфора в смытых почвах тальвегов ручьев можно объяснить поступлением органических соединений фосфорной кислоты, содержащихся в припахиваемом слое подпахотного горизонта.

БЛАГОДАРНОСТИ

Использованные спутниковые снимки предоставлены DigitalGlobe Foundation.

ACKNOWLEDGEMENTS

Used satellite imagery is courtesy of the DigitalGlobe Foundation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алифанов В.М., Гугалинская Л.А., Овчинников А.Ю. Палеокриогенез и разнообразие почв центра Восточно-Европейской равнины. М.: ГЕОС, 2010. 160 с.
2. Голосов В.Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М.: ГЕОС, 2006. 296 с.
3. Еременко Е.А. Ложбинный мезорельеф центральных и южных районов Восточно-Европейской равнины. Автореф. канд. дисс. М., 2009. 24 с.
4. Маркелов М.В. Современные эрозионно-аккумулятивные процессы в верхних звеньях гидрографической сети лесной и лесостепной зон. Автореф. канд. дисс. М., 2004. 26 с.
5. Марусова Е.А. Влияние природных и антропогенных факторов на свойства пахотных серых лесных почв южного Подмосковья. Автореф. канд. дисс. М., 2005. 23 с.
6. Степанов И.Н. Внедрение в картографию почвенно-геологических образов – потоковых структур // Почвоведение. 1995. № 6. С. 681–694.
7. Тимофеев Д.А. Геоморфологические и палеогеографические аспекты проблемы эрозии почв // Размышления о фундаментальных проблемах геоморфологии. Избранные труды. М.: Медиа-ПРЕСС, 2011. С. 298–304.

8. 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.
9. Трофимец Л.Н., Паниди Е.А. Методы геоморфометрии, дистанционного зондирования и ГИС при изучении распределения радионуклида ⁴⁰К в почве распахиваемых склонов, осложненных ложбинной сетью // Материалы Междунар. конф. «ИнтерКарто/ИнтерГИС». 2016; 22(1). С. 183–189. DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-183-189.
10. Трофимец Л.Н., Паниди Е.А., Иванеха Т.Л., Петелько А.И. Оценка эрозионной активности ложбинного комплекса распахиваемых склонов // Материалы Междунар. конф. «ИнтерКарто/ИнтерГИС». 2017; 23(1). С. 323–332. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-1-23-323-332.
11. Шарый П.А. Оценка взаимосвязей рельеф-почва-растения с использованием новых методов в геоморфометрии. Автореф. канд. дисс. Тольятти, 2005. 25 с.
12. Costa-Cabral M.C., Burges S.J. Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas // Water Resources Research. 1994. V. 30, issue 6. P. 1681–1692. DOI: 10.1029/93WR03512.
13. Evans L.S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: Chorley R.J. (ed.) Spatial Analysis in Geomorphology, London, Methuen & Co. Ltd., 1972. P. 17–90.
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 // Appl. Isot. 1996. V. 47, No 7. P. 699–707.

REFERENCES

1. Alifanov V.M., Gugalinskaya L.A., Ovchinnikov A.U. Paleocryogenesis and Soil Diversity of the Center of East European Plain. Moscow: GEOS, 2010. 160 p. (in Russian).
2. Costa-Cabral M.C., Burges S.J. Digital Elevation Model Networks (DEMON): A Model of Flow Over Hillslopes for Computation of Contributing and Dispersal Areas. Water Resources Research. 1994. V. 30, issue 6. P. 1681–1692. DOI: 10.1029/93WR03512.
3. Eremenko E.A. Ravine Mesorelief the Central and Southern Regions of the East European Plain. Abstract of PhD dissertation. M.: 2009. 24 p. (in Russian).
4. Evans L.S. General Geomorphometry, Derivatives of Altitude, and Descriptive Statistics. In: R.J. Chorley (ed.) Spatial Analysis in Geomorphology. London, Methuen & Co. Ltd., 1972. P. 17–90.
5. 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.
6. Golosov V.N. Erosion-accumulative Processes in River Basins of the Mastered Plains. Moscow: GEOS, 2006. 296 p. (in Russian).
7. 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. M., 2004. 26 p. (in Russian).
8. Marusova E.A. Influence of Natural and Anthropogenic Factors onto the Properties of Arable Gray Forest Soils of the Southern Moscow Suburbs. Abstract of PhD dissertation. M., 2005. 23 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. Appl. Isot. 1996. V. 47, No 7. P. 699–707.
10. Shary P.A. Evaluation of Relief-soil-plant Relationships Using New Methods of Geomorphometry. Abstract of PhD dissertation. Tolyatti, 2005. 25 p. (in Russian).

11. *Stepanov I.N.* Introduction of Soil-geological Images of Stream Structures into Cartography. *Pedology [Pochvovedenie]*. 1995. No 6. P. 681–694 (in Russian).
12. *Timofeev D.A.* Geomorphological and Paleogeographic Aspects of Soil Erosion Problem. In: *Razmyshleniya o fundamental'nykh problemakh geomorfologii. Izbrannye trudy [Reflections on the Fundamental Problems of Geomorphology. Selected works]*. Moscow: Media-PRESS, 2011. P. 298–304 (in Russian).
13. *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. *Problemy regional'noi ekologii [Problems of Regional Ecology]*. 2014. No 4. C. 147–152 (in Russian).
14. *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. *Proceedings of the International conference "InterCarto/InterGIS"*. 2016. 22(1). P. 183–189. DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-183–189 (in Russian).
15. *Trofimetz L.N., Panidi E.A., Ivanekha T.L., Petelko A.I.* Estimation of Erosion Activity in the Ravine Complex of Arable Slopes. *Proceedings of the International conference "InterCarto / InterGIS"*. 2017. 23(1). P. 323–332. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-1-23-323-332 (in Russian).