

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.4:632.125

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ЭРОЗИОННЫЕ ПОТЕРИ ПОЧВЫ НА ПАХОТНЫХ ЗЕМЛЯХ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

© 2019 г. К. А. Мальцев^а, *, О. П. Ермолаев^а

^аКазанский (Приволжский) федеральный университет, Институт экологии и природопользования,
ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008 Россия

*e-mail: mlevkirill@mail.ru

Поступила в редакцию 15.02.2019 г.

После доработки 19.04.2019 г.

Принята к публикации 29.05.2019 г.

Проведена количественная оценка потенциального смыва почв на пахотных землях европейской части России (площадь около 4 млн км²). Уровень генерализации работ – региональный и соответствует масштабу 1 : 500 000. В качестве метода исследований используется математическое моделирование, основанное на применении модифицированного в научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов МГУ им. М.В. Ломоносова уравнения по расчету потенциальных потерь почвы от эрозии. Другим ведущим методом по оценке эрозии почв и представления результатов является геоинформационный. В расчетах использована растровая модель представления данных, включающая модель углов наклона, длины склонов, смываемости почв, эрозионного потенциала осадков, запасов воды в снеге, внутригодового перераспределения дождевых осадков и типов землепользования. Получены новые данные о величине эрозионных потерь почвы за периоды талого, ливневого стока и суммарные годовые потери. Составлена электронная карта эрозионных потерь почвы на пахотных землях европейской части России, позволяющая определить пространственные особенности темпов эрозии почв. Эрозионные потери почвы в среднем для территории исследования составляют 11 т/га в год в условиях пара и 3 т/га в год – с учетом почвозащитных коэффициентов агрокультурной растительности. Около половины территории расположено в условиях, при которых величина смыва не превышает 0.5 т/га в год, а на остальной площади доминирует смыв от 10 до 15 т/га в год. Темпы потенциальной эрозии почв на пахотных землях европейской части России закономерно уменьшаются в направлении от таежно-лесной к степной ландшафтной зоне. Четко выделяется полоса максимального потенциального смыва почв западно-восточного субширотного простирания, приуроченная к подзоне смешанных и широколиственных лесов с очень высокой распаханностью. Кроме того, определены потенциальные эрозионные потери почвы в 50 субъектах Российской Федерации, расположенных на территории исследования как для условий чистого пара, так и с учетом агроценозов.

Ключевые слова: водная эрозия почв, картографирование, геоинформационные системы, эрозионный потенциал осадков

DOI: 10.1134/S0032180X19120104

ВВЕДЕНИЕ

Водная эрозия является ведущим процессом денудации в пределах суши и одновременно осуществляет миграцию загрязняющих веществ, транспортируемых совместно с наносами [12, 48]. Кроме того, эрозия – один из главных факторов ускоренной деградации почвенного покрова на пахотных землях.

Проблема количественной оценки темпов почвенной и овражной эрозии является одной из ключевых в плане сохранения продуктивности земель и обеспечения населения продовольствием. Равнинные ландшафты европейской части России (ЕЧР) с их плодородными почвами – ос-

новная сельскохозяйственная житница страны. Этот фактор во многом исторически обусловил высокую земельную освоенность региона. Бассейны большинства малых рек распаханы более чем на 70–80%. Пашнями заняты все более или менее удобные участки. Длительное и интенсивное сельскохозяйственное воздействие привело к значительной по интенсивности и площадному охвату почвенной эрозии природно-антропогенного характера, когда смыв превышает допустимые потери почвы.

Вопросам количественной оценки интенсивности почвенной эрозии, а также ее пространственного развития с использованием эрозионного моделирования в пределах объектов разного

уровня генерализации – от малого водосбора до континента – уделяется большое внимание [34].

В настоящее время для расчета эрозионных потерь почв широко используются геоинформационные системы, позволяющие обрабатывать огромные объемы данных с приемлемой по точности и пространственной детальности оценкой величин смыва на различных уровнях генерализации. Можно с уверенностью сказать, что современные информационные технологии в этом направлении осуществили настоящий прорыв, дав возможность провести оценку эрозии для беспрецедентно больших территорий.

Одно из основных современных направлений в исследованиях интенсивности почвенной эрозии – это развитие и применение разнообразных эрозионных моделей. Моделирование как метод исследования широко применяется в эрозиоведении [11]. Существуют различные классификации моделей эрозии. В целом их подразделяют на эмпирические и физически обоснованные. Пример эмпирических моделей – это USLE [49], RUSLE [44], MUSLE [35] и их модификации. С использованием этих моделей в международной поисковой базе Web of Science только за последние 5 лет опубликовано почти 1000 статей. В группу физически обоснованных (process-based) моделей входят LISEM [33], WEPP [42], SWAT [47], MMF [36], [45], WATER/SEDEM [43], EUROSEM [37] и др.

Отечественные и постсоветские модели представляют формулы Швейбса [21], Мирцхулавы [15], Сурмача [20], уравнение и модель государственного гидрологического института [10, 12] и др. Наиболее полный обзор современных методов моделирования эрозионных процессов и крупные обобщения по современному состоянию исследований в этой области, тенденциях и проблемах моделирования в эрозиоведении содержатся в капитальных трудах российских исследователей Литвина [12], Лисецкого [11], Чалова [23] и др.

В предлагаемом исследовании излагается методика и результаты геоинформационной оценки потенциального смыва почв на пахотных землях ЕЧР. В соответствии с пространственной детальностью большей части исходных данных, получаемая в исследовании тематическая карта потенциального смыва почв, по нашему мнению, соответствует масштабу 1 : 500 000.

ИЗУЧАЕМАЯ ТЕРРИТОРИЯ

ЕЧР занимает площадь около 4 млн км² и расположена в нескольких ландшафтных зонах: от тундры до полупустынь умеренного пояса. По данным “Карты типов земного покрова”, полученной по материалам космической съемки TerraNorte RLC v.3 на 2014 г., разработанной Институтом космических исследований РАН, общая

площадь пахотных земель ЕЧР составляет около 650 000 км². Здесь проживает большая часть населения России – около 95 млн человек.

Оценка эрозионных потерь почвы с представлением результата на картографической модели для ЕЧР проводится не впервые. Например, в конце XX в. многие регионы ЕЧР были обеспечены почвенно-эрозионными картами среднего масштаба на субъекты СССР: “Почвенно-эрозионная карта Республики Марий Эл” (1993 г.; 1 : 200 000); “Карта эрозии почв ТАССР” (1983 г.; 1 : 300 000); “Почвенная карта Чувашской АССР” (1986 г.; 1 : 300 000); “Почвенная карта Ульяновской области” (1983 г.; 1 : 300 000) и др. Карты были составлены местными Гипроземами, они не лишены недостатков, нуждаются в корректировке [5, 6] и не отражают современное состояние, поскольку составлены по материалам почвенных съемок более чем 50–60-летней давности. В настоящее время появляются новые региональные исследования эрозии почв в пределах ЕЧР, выполненные с использованием ГИС-технологий. Например, картографические модели почвенной эрозии были созданы на основе единой методики с использованием бассейнового подхода в пределах Центрально-Черноземного района: Белгородской, Воронежской, Липецкой, Тамбовской и Курской областей [2, 19]. В пределах Среднего Поволжья (Республика Татарстан, Республика Марий-Эл, Чувашская республика, Ульяновская область) также на основе бассейнового подхода были количественно оценены и картографированы среднесезонные потери почв от эрозии [6, 7, 31]. Примерами подобных исследований могут служить работы в пределах некоторых речных бассейнов: Иж, Меша, Улема, Медведица, Ведуга, Самара, Калаус, Кума [29]. Особого внимания заслуживают исследования, выполненные по оценке и картографированию почвенной эрозии на основе последних модернизаций универсального уравнения эрозии почв и модели государственного гидрологического института (1985–1995 гг.) для всей территории России сотрудниками научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов (НИЛЭП и РП) МГУ им. М.В. Ломоносова [12, 14]. Итоги проведенных работ в конце 1990-х гг. отражены на мелкомасштабных картах-схемах эрозионноопасных земель ЕЧР и всей России. На них методом ареалов с очень высокой степенью генерализации показаны величины смыва почвы на пахотных и пастбищных землях (например, в Ульяновской и Оренбургской областях выделено лишь два ареала с различной интенсивностью смыва). Севернее субширотной полосы по линии Санкт-Петербург–Киров в лесо-таежной и тундровой зоне смыв вообще не определялся. Подсчитаны также величины интенсивности смыва почв на 1995 г. на пахотных землях в субъектах

Российской Федерации (РФ). Анализ материалов показывает, что полученные величины эрозионных потерь почвы для территории ЕЧР имеют низкую пространственную детальность. Они обобщены либо на укрупненные по условиям рельефа ареалы, либо на единицы административного деления (субъекты РФ). Отсутствуют расчеты смыва почв на почти половину территории ЕЧР в пределах лесо-таежных ландшафтов (севернее 60° N).

Кроме этого, почвенная эрозия ЕЧР в разное время картографировалась в рамках проектов для более крупных территорий [3, 16, 17, 38–40, 46].

Таким образом, анализ ранее опубликованных материалов свидетельствует о том, что для территории ЕЧР ранее не проводилась количественная оценка современных эрозионных потерь почвы на пашне с использованием ГИС-технологий на региональном уровне генерализации (в масштабе 1 : 500000).

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Для оценки почвенной эрозии использовали тематическое моделирование, методически разработанное в НИЛЭП и РП МГУ [10]. Основные расчетные формулы имеют вид.

Суммарный потенциальный годовой смыв определяли по формуле:

$$C_T = C_L + C_T, \quad (1)$$

где C_L , C_T – модули смыва от стока дождевых и талых вод соответственно, т/га в год.

Оценку потенциального ливневого смыва почв проводили по зависимости:

$$C_L = f(D, P, R, K_T), \quad (2)$$

где D – эрозионный потенциал дождевых осадков максимальной 30-минутной интенсивности; P – смываемость почв, т/га на единицу эрозионного потенциала осадков; R – эрозионный потенциал рельефа, K_T – почвозащитный коэффициент агрокультурной растительности.

Смыв от стока талых вод рассчитан по эмпирической зависимости:

$$C_T = f(P, h, L, I, K_T), \quad (3)$$

где h – средний слой стока за период снеготаяния, мм; I – уклон склона, тангенс угла наклона; L – длина склона, м; K_T – почвозащитный коэффициент агрокультурной растительности; P – смываемость почвы.

Несмотря на кажущуюся простоту определения потенциальной эрозии, принципиальное значение имеет подготовка исходных данных, соответствующих масштабу заданного уровня генерализации.

Подготовка исходных данных

В расчетах использовали растровую модель представления пространственных данных, включающую модель углов наклона, длины склонов, смываемости почв, эрозионного потенциала дождевых осадков (ЭПО), запасов воды в снеге, внутригодового перераспределения дождевых осадков и типов землепользования. Для представления всех растровых моделей использовали равноплощадную коническую проекцию Альберса со следующими параметрами: сдвиг на восток – 850000 м; сдвиг на север – 0 м; центральный меридиан – 45° E; стандартная параллель 1 – 64° N; стандартная параллель 2 – 52° N; исходная широта – 0°; используемый эллипсоид – WGS84.

Модель землепользования

Все расчеты по эрозии почв выполнены только для пахотных земель ЕЧР. Границы пашни получены с “Карты типов земного покрова” TerraNorte RLC v.3, разработанной Институтом космических исследований РАН. В настоящее время эта информация представлена на карте пахотных земель геопортала “Речные бассейны Европейской России” <http://bassepr.kpfu.ru> [50]. Данная модель обновляется ежегодно и имеет пространственную детальность, соответствующую масштабу 1 : 500000. В наших исследованиях использовали версию модели 2014 г. Полное описание методики создания этой модели приведено Бартаевым с соавт. [1].

Параметры рельефа

Для создания растровых моделей углов наклона и длины склонов была подготовлена цифровая модель рельефа (ЦМР), которая в свою очередь создана на основе глобальной общедоступной модели рельефа GMTED2010 [27]. Пространственная детальность данной модели соответствует масштабу 1 : 500000 [8]. На основе полученной ЦМР в ГИС ARCGIS вычислены базовые для расчетов характеристики рельефа: угол наклона и длина склонов [26]. Длину склонов оценивали с использованием показателя длины линий тока. Длина линий тока в ГИС может быть рассчитана по-разному [47]. Мы использовали показатель, с помощью которого вычисляется длина вдоль направлений потоков от водораздела до каждой точки склонов исследуемой территории.

Почвы

Для подготовки данных о свойствах почвы использовали “Единый государственный реестр почвенных ресурсов России”, данные которого представлены на сайте <http://egrpr.esoil.ru> [4]. Реестр состоит из двух частей: базы атрибутив-

ной информации свойств почвенных разрезов и самой почвенной карты. Подробное описание создания геоинформационной базы данных этого реестра изложено в нескольких статьях сотрудников Почвенного института им. В.В. Докучаева [18, 19].

Для расчетов использовали не все разновидности почв. Исключены гидроморфные почвы, поскольку их местоположение исключает возможность проявления склоновой эрозии.

Климат

Для расчетов потенциальных потерь почвы на пахотных землях ЕЧР с использованием методики НИЛЭП и РП нужна информация о климатических условиях, в частности, об ЭПО максимальной 30-минутной интенсивности и его внутригодовом распределении, а также о запасах воды в снеге. Карты этих климатических параметров, созданные сотрудниками НИЛЭП и РП [10, 12], отражают ситуацию середины 80-х гг. прошлого столетия. Между тем, в последние десятилетия произошли заметные изменения в климатической системе. Наблюдается увеличение годовых сумм осадков как в летне-осенний [32], так и в зимний период [22]. Для теплого сезона года за период с 1960 по 2015 гг. отмечается тенденция увеличения осадков, способных вызвать смыл почвы (интенсивностью >10 мм/сут) [30]. Несмотря на увеличение количества осадков холодного периода, на большей части территории исследования наблюдается значительное сокращение талого стока [13], что закономерно должно приводить к уменьшению эрозии.

Поэтому для расчетов предпринята попытка создания картографической модели современного пространственного распределения эрозионного потенциала дождевых осадков на ЕЧР. Учитывая особенности используемой эрозионной модели, в которой доля талого стока в годовых потерях почв от эрозии очень невелика ($<10\%$), было принято решение о привлечении к расчетам ранее созданной в 1970-х гг. карты запасов воды в снеге. Принято еще одно допущение, что внутригодовое перераспределение жидких осадков осталось приблизительно неизменным.

Актуализированная модель ЭПО создана на основе данных ежедневных наблюдений на метеостанциях с 1965 по 2015 гг. Данные загружены с официального сайта ФГБУ ВНИГМИ-МЦД (<http://meteo.ru/>). Построение растровой модели ЭПО выполнено в два этапа с использованием разработанных специально для этой задачи компьютерных программ в среде программирования "R" [24].

На первом этапе для вычисления ЭПО на каждом метеопосту была использовали зависимость [9]:

$$R_{30} = 3.19e^{0.006P}, \quad (4)$$

где P – среднесуточная сумма слоя суточных осадков более 10 мм в теплое время года (теплое время года определяется по моменту времени, когда среднесуточная температура воздуха выше 0°C).

На втором этапе с использованием метода пространственной интерполяции МВА [28] и полученных значений ЭПО на метеопостах была рассчитана растровая модель среднесуточной ЭПО за период 1965–2015 гг. (рис. 1).

Как ранее отмечалось, растровая модель запасов воды в снеге создана на базе опубликованной карты [10]. Растровая модель внутригодового распределения эрозионного потенциала осадков создана в результате оцифровки одноименной карты.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Главным результатом исследования является количественная оценка потенциальных современных потерь почвы от эрозии на пахотных землях ЕЧР с ее отражением на соответствующей тематической карте (рис. 2). Полученные результаты были обобщены на ранее созданную нами сетку бассейнов малых рек с целью возможности реализации бассейнового управления природопользованием крупных территорий [8].

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что, величина потенциальной эрозии на пахотных землях ЕЧР изменяется в широких пределах: от 0 до 113 т/га в год. В то же время средняя величина потенциальных потерь почвы с черного пара равна 11 т/га в год. При этом около половины территории расположено в условиях, при которых величина смыва не превышает 0.5 т/га в год (рис. 3), а на остальной площади доминирует потенциальный смыв от 10 до 15 т/га в год. Можно сказать, что распределение территорий по диапазонам смыва носит вид, близкий к нормальному (поскольку первый диапазон выделяет области, где смыва практически нет или он ничтожен).

При этом, если учесть почвозащитные коэффициенты агрокультурной растительности, данные по которым для территории исследования приведены, например, в работе Литвина с соавт. [14], среднегодовые эрозионные потери почвы на пахотных землях ЕЧР можно оценить в 3.3 т/га в год.

Анализируя пространственное распределение потенциальных потерь почвы по субъектам РФ, имеющих высокую распаханность (рис. 2), можно сказать, что наименьшие значения смыва наблюдаются в Тамбовской, Саратовской, Волгоградской и Воронежской областях. Наибольшие эрозионные потери почвы наблюдаются в Республике Татарстан, Орловской, Курской, Белгородской областях и Ставропольском крае. При этом различия в темпах эрозии в регионах, находящихся в одной ландшафтной зоне (Воронежская, Курская, Белгородская области), обуслов-

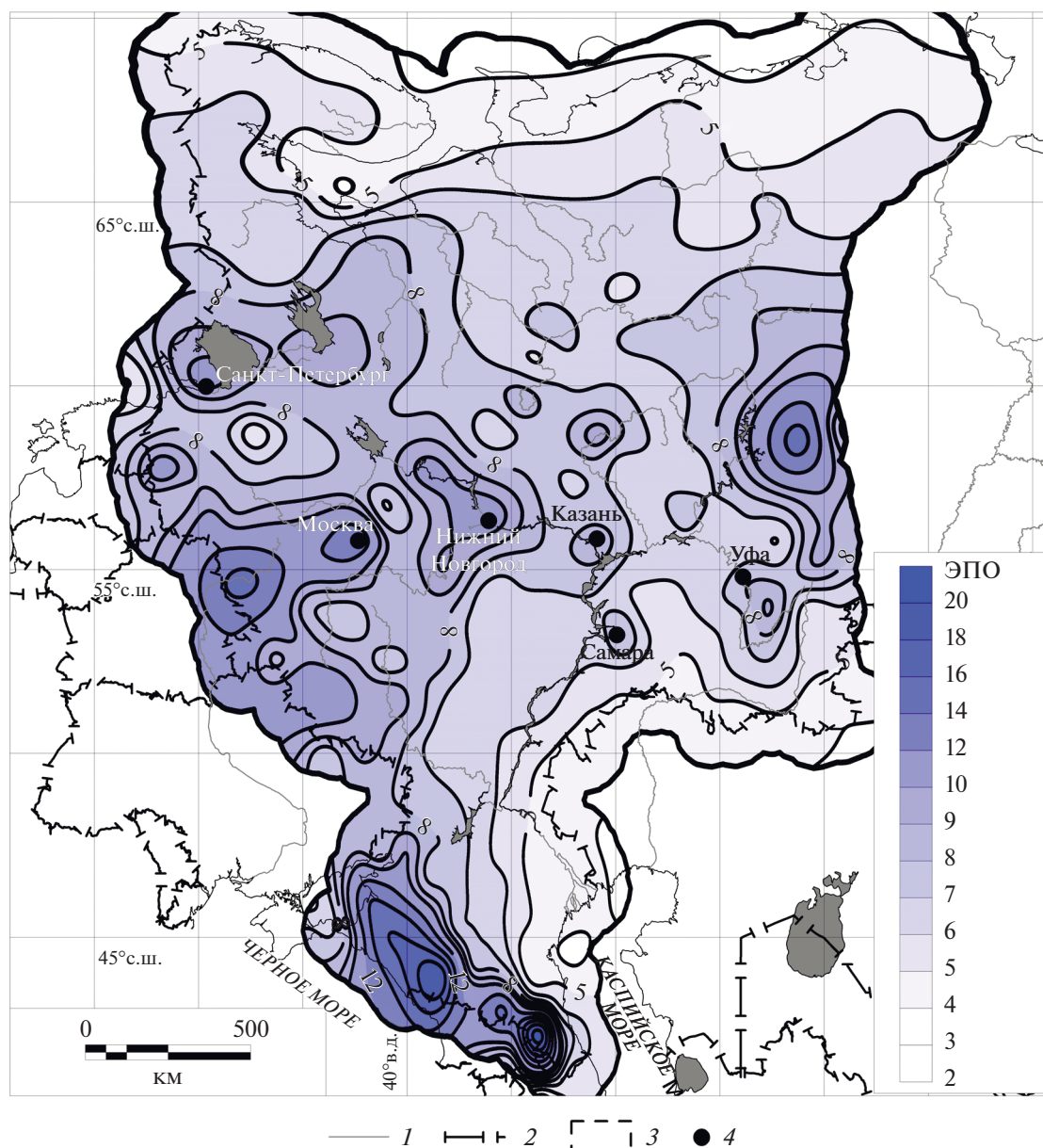


Рис. 1. Актуализированная карта ЭПО максимальной 30-ти минутной интенсивности (1 – речная сеть; 2 – государственные границы; 3 – граница территории исследования; 4 – населенные пункты, изолинии – значения ЭПО).

лены, главным образом, рельефом этих территорий. Высокая и очень высокая почвенная эрозия характерна для республик Северного Кавказа (Карачаево-Черкессии, Северной Осетии, Дагестана, Чеченской и Ингушской Республик) в основном из-за возвышенного (горного) рельефа с его высоким эрозионным потенциалом и таких же высоких показателей ЭПО.

Высокие значения потенциальных потерь почвы наблюдаются в регионах, расположенных преимущественно в таежно-лесной ландшафтной зоне с низкой распаханностью, но высокой смываемостью преобладающих здесь дерново-подзолистых и

подзолистых почв (Albic Retisols (Ocric) и Albic Podzols): Пермский край, Удмуртия, Республика Марий-Эл, Нижегородская, Кировская, Ивановская и Костромская области (табл. 1).

При этом безвозвратные значения смыва почв будут существенно ниже, если учесть допустимые потери почвы. Однако такая задача не ставилась при проведении данного исследования. Можно лишь привести ранее полученные расчеты для востока Русской равнины в пределах лесной и лесостепной зоны Республики Татарстан. В этом регионе с преобладающими возвышенными ландшафтами значения допустимых потерь почвы

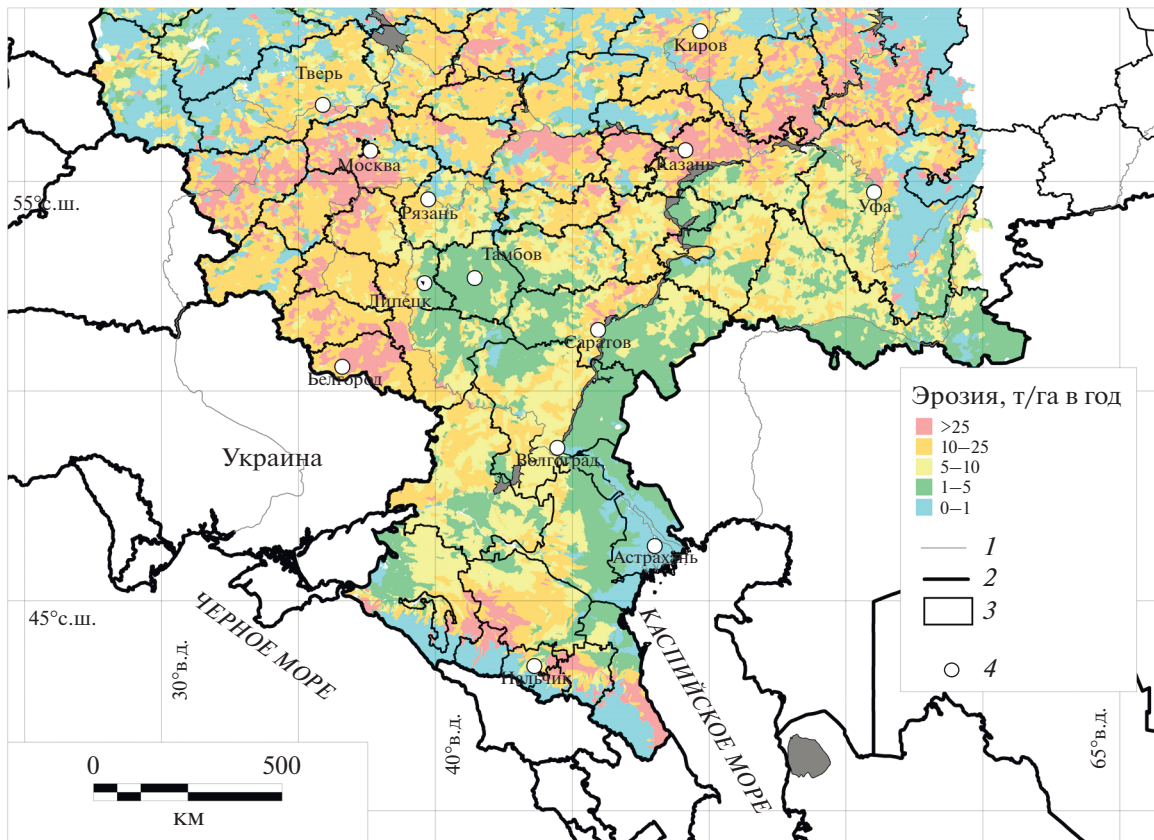


Рис. 2. Потенциальные эрозионные потери почвы на пахотных землях ЕЧР (осредненные по бассейнам малых рек в условиях пара): 1 – реки; 2 – государственные границы; 3 – границы субъектов РФ; 4 – города.

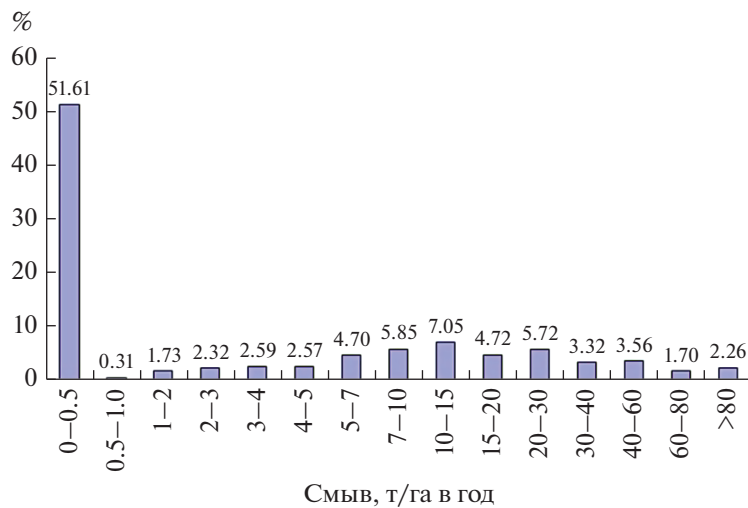


Рис. 3. Распределение величин потенциальных эрозионных потерь почвы на пашнях ЕЧР, % от площади региона.

колеблются от 3.6 до 6.0 т/га в год. Наибольшие значения допустимого смыва характерны для территории Закамья, где широко развиты черноземы, а наименьшие – для Предкамья и северного Предволжья с серыми лесными и дерново-подзолистыми почвами [7].

На составленной тематической карте (рис. 2) хорошо видно, что темпы эрозии почв на незащищенной культурной растительностью пашне закономерно уменьшаются в направлении от таежно-лесной (20 т/га в год) к степной ландшафтной зоне (8.13 т/га в год). Хорошо выделяется полоса

Таблица 1. Средние значения потенциальных эрозионных потерь почвы на пахотных почвах в субъектах РФ

Субъект РФ	Среднее т/га в год		Пашня, % от площади субъекта
	пар	с учетом агроценозов	
Республика Карелия	10.33	1.86	0.1
Ленинградская область	7.11	1.64	1.1
Псковская область	8.19	1.88	1.4
Архангельская область	17.46	3.14	0.2
Новгородская область	7.33	1.69	0.8
Тверская область	14.57	3.35	2.5
Вологодская область	19.31	3.48	1.5
Смоленская область	25.22	5.80	4.8
Республика Коми	18.99	3.42	0.1
Брянская область	16.25	3.74	14.4
Ярославская область	16.77	3.86	4.5
Московская область	21.16	4.87	8.6
Калужская область	21.88	5.03	11.0
Костромская область	20.99	4.83	2.8
Владимирская область	19.64	4.52	10.1
Тульская область	14.33	3.30	37.2
Орловская область	17.11	6.50	50.8
Ивановская область	18.03	4.15	8.1
Курская область	19.30	7.33	52.8
Кировская область	20.55	4.73	6.9
Рязанская область	10.19	2.34	27.4
Белгородская область	24.97	10.74	50.3
Нижегородская область	21.77	5.01	14.7
Липецкая область	8.68	3.30	60.9
Воронежская область	8.96	3.85	53.9
Тамбовская область	3.29	1.25	60.3
Мордовская Республика	13.65	5.19	31.8
Республика Марий-Эл	20.20	4.65	12.5
Пензенская область	6.40	2.43	38.0
Пермский край	27.79	5.00	4.3
Чувашская Республика	20.01	4.60	24.0
Удмуртская Республика	28.83	6.63	17.7
Саратовская область	5.85	2.51	50.2
Волгоградская область	6.49	2.79	43.9
Ульяновская область	8.61	3.27	34.4
Республика Татарстан	16.08	6.11	46.9
Ростовская область	8.55	3.68	58.6
Краснодарский край	8.84	3.80	50.3
Самарская область	7.84	2.98	45.4
Республика Адыгея	8.60	3.70	29.8
Республика Башкирия	8.99	2.07	21.2
Ставропольский край	12.93	5.56	62.6
Оренбургская область	5.96	2.56	37.2
Республика Калмыкия	7.62	3.28	7.8
Астраханская область	2.64	1.13	1.4
Карачаево-Черкесская Республика	34.78	14.95	5.6
Кабардино-Балкарская Республика	16.53	7.11	18.8
Республика Северная Осетия	19.13	8.23	21.1
Республика Дагестан	29.06	12.49	3.5
Чеченская и Ингушская Республики	30.65	13.18	22.3

Таблица 2. Статистические показатели потенциальных эрозионных потерь почвы на пашне в субъектах РФ, рассчитанных с учетом почвозащитных коэффициентов агрокультурной растительности, т/га в год

Субъект РФ	Среднее*		Расхождение, %
	масштаб 1 : 500 000	масштаб 1 : 200 000 и 1 : 50 000	
Республика Татарстан	6.11	4.82	21.4
Белгородская область	10.74	9.98	7.1

* Пространственные данные, детальность которых соответствует приведенным масштабам.

максимального смыва почв западно-восточного субширотного простираения, приуроченная к подзоне смешанных и широколиственных лесов с очень высокой распаханностью, а также западный долготный сектор высокого смыва почв, включающий лесную и лесостепную ландшафтные зоны. На наш взгляд решающее значение в уменьшении смыва в южном направлении играют показатели смываемости почв, также закономерно уменьшающиеся к югу ЕЧР благодаря широкому развитию в степной зоне черноземов и значительному сокращению талого стока.

В лесной ландшафтной зоне на пахотных землях, напротив, широко развиты дерново-подзолистые и подзолистые почвы (Albic Retisols (Ocric) и Albic Podzols), имеющие пылеватую структуру, слабо противостоящую поверхностному склоновому стоку. Минимальный смыв, наблюдаемый в полупустынях (4.7 т/га в год), связан с общим уплощенным характером рельефа, малыми величинами поверхностного стока, особенно резким (до его полного отсутствия) уменьшением доли талого стока в смыве почв и “ареальным” характером земледелия. Здесь в деградации почвы на первый план выходят процессы дефляции.

ВЕРИФИКАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты величин смыва проверены тем же расчетным методом, но с привлечением материалов высокой детальности на локальных территориях. В качестве таких ключевых территорий выбрано два субъекта РФ: Республика Татарстан и Белгородская область. Выбор этих регионов обусловлен их значительной земледельческой освоенностью (площадь пашни около 50%), высокой интенсивностью почвенной и овражной эрозии и наличием исходной информации. Геобазы данных, используемая для расчетов, соответствовала масштабу 1 : 200 000 для Татарстана и 1 : 50 000 для Белгородской области.

Кроме этого, в качестве проверочных объектов использовали бассейны малых рек, находящихся в разных ландшафтных зонах: Иж (Удмуртская Республика); Меша (Республика Татарстан); Медведица (Саратовская область); Ведуга (Воронежская область); Самара (Оренбургская область); Кума и

Калаус (Ставропольский край). В этих бассейнах вся исходная для расчетов информация соответствовала масштабу 1 : 50 000.

Анализ полученных в ходе проверки расчетных данных об эрозионных потерях почвы позволяет утверждать, что полученные нами величины смыва пахотных почв для всей территории ЕЧР в масштабе 1 : 500 000 в среднем сопоставимы с результатами расчетов на ключевых участках, обеспеченных более детальными данными для расчетов смыва. Наблюдаемые расхождения в большинстве тестовых территорий (табл. 2, 3) не превышают 20% (за исключением бассейна р. Иж).

Карту эрозионных потерь почвы для территории ЕЧР сравнивали с аналогичной картой эрозии почв, составленной тем же расчетным методом для территории Западной Европы [25, 41]. Величины эрозионных потерь для Западной Европы в среднем колеблются от 2.46 до 2.76 т/га в год. Эти значения очень близки к полученным нами результатам (3.3 т/га в год). Модуль потенциального смыва почв, рассчитанный сотрудниками НИЛЭП и РП МГУ для территории ЕЧР [14] на 1980 г., в среднем составил 4.7 т/га в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для территории ЕЧР впервые проведена оценка потенциальных эрозионных потерь пахотных почв расчетным методом с использованием геоинформационных технологий в масштабе 1 : 500 000. Общая площадь распаханых земель, где произведены расчеты потенциальной эрозии, составила 650 000 км². Расчеты проведены для условий чистого пара и с учетом почвозащитных коэффициентов агрокультурной растительности. В ходе исследований получены новые значения распределения эрозионного потенциала осадков за период 1965–2015 гг., представленные на соответствующей тематической карте. Составлена карта, показывающая пространственное распределение потенциальных эрозионных потерь почвы в масштабе 1 : 500 000. Эрозионные потери почвы в среднем для территории ЕЧР составляют 11 т/га в год в условиях пара и 3.3 т/га в год с учетом почвозащитных коэффициентов агрокультурной растительности.

Таблица 3. Средние значения потенциальных потерь почвы от эрозии за 1965–2015 гг. в пределах ключевых бассейнов

Бассейн реки	Потери почвы, т/га в год		Расхождение, %
	масштаб 1 : 50000	масштаб 1 : 500000	
Медведица, Саратовская область	2.10	2.12	0.9
Ведуга, Воронежская область	5.55	6.57	18.4
Иж, Удмуртская Республика	4.51	6.13	35.9
Калаус, Ставропольский край	14.34	13.83	3.6
Кума, Ставропольский край	15.55	12.57	19.2
Меша, Республика Татарстан	7.30	7.91	8.4
Улема, Республика Татарстан	5.37	6.35	18.3
Самара, Оренбургская область	2.52	2.27	9.9

Темпы потенциальной эрозии почв на пахотных землях ЕЧР закономерно уменьшаются в направлении от таежно-лесной к степной ландшафтной зоне. Четко выделяется полоса максимального смыва почв западно-восточного субширотного простирания, приуроченная к подзоне смешанных и широколиственных лесов с очень высокой распаханностью. Также интенсивный смыв почв наблюдается на юге ЕЧР в предгорьях Северного Кавказа. Еще одну область высокой эрозии формирует западный долготный сектор, включающий лесную и лесостепную ландшафтные зоны. В полупустынных ландшафтах наименьший смыв обусловлен общим уплощенным характером рельефа, малыми величинами поверхностного стока, особенно резким (до его полного отсутствия) уменьшением доли талого стока в смыве почв и “ареальным” характером земледелия. Интенсивная эрозия почв в предгорьях Северного Кавказа обусловлена высокими значениями эрозионных потенциалов возвышенного рельефа и осадков.

Проведенный анализ качества полученной количественной оценки показал сопоставимость полученных результатов с результатами среднemasштабного и крупномасштабного моделирования. Кроме этого, анализ качества полученной количественной оценки эрозии показал сопоставимость полученных данных с результатами моделирования, выполненного в аналогичном масштабе в пределах стран Европейского Союза.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (проект № 19-17-00064).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Флитман Е.В.* Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разре-

шения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. № 2(9). С. 9–27.

2. *Буряк Ж.А.* Совершенствование подходов к оценке эрозионной опасности агроландшафтов с использованием ГИС-технологий // Научные ведомости БелГУ. Серия Естественные науки. 2014. Вып. 29. № 23. С. 140–146.
3. Государственная почвенно-эрозионная карта России и сопредельных стран (европейская часть). М-б 1 : 2500000. Москва: ЭКОР, 1999. 4 с.
4. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2014. 768 с.
5. *Ермолаев О.П.* Геоинформационное картографирование эрозии почв в регионе Среднего Поволжья // Почвоведение. 2017. № 1. С. 130–144.
6. *Ермолаев О.П.* Эрозия в бассейновых геосистемах. Казань, 2002. 264 с.
7. *Ермолаев О.П., Мальцев К.А.* Оценка эрозионного риска почвенного покрова в лесных и лесостепных ландшафтах Среднего Поволжья средствами ГИС-технологий // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2008. № 150(4). С. 85–98.
8. *Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Мухарамова С.С., Харченко С.В., Веденева Е.А.* Картографическая модель речных бассейнов европейской России // География и природные ресурсы. 2017. № 2. С. 27–36.
9. *Канатьева Н.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф.* Современные изменения климатических факторов эрозии в Северном Приволжье // Эрозия почв и русловые процессы. 2010. № 17. С. 14–28.
10. *Ларионов Г.А.* Эрозия и дефляция почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 200 с.
11. *Лисецкий Ф.Н., Светличный А.А., Черный С.Г.* Современные проблемы эрозиоведения. Белгород: Константа, 2012. 456 с.
12. *Литвин Л.Ф.* География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: Академкнига, 2002. 256 с.
13. *Литвин Л.Ф., Голосов В.Н., Добровольская Н.Г., Иванова Н.Н., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф.* Стационарные исследования эрозии почв при снеготая-

- нии в центральном Нечерноземье // Эрозия почв и русловые процессы. 1998. № 11. С. 57–76.
14. Литвин Л.Ф., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Добровольская Н.Г. География динамики земледельческой эрозии почв на европейской территории России // Почвоведение. 2017. № 11. С. 1390–1400.
 15. Мирицхулава Ц.Е. Инженерные методы расчета и прогноз водной эрозии. М.: Колос, 1970. 239 с.
 16. Национальный атлас почв Российской Федерации / Под ред. С.А. Шобы. М.: Астрель, 2011. 632 с.
 17. Почвенно-эрозионная карта СССР. Масштаб 1 : 5 000 000 / Под ред. С.С. Соболева. М.: ГУГК, 1968.
 18. Рухович Д.И., Вагнер В.Б., Вильчевская Е.В., Калинина Н.В., Королева П.В. Проблемы использования цифровых тематических карт на территорию СССР при создании ГИС “Почвы России” // Почвоведение. 2011. № 9. С. 1043–1055.
 19. Снесивый О.В., Лисецкий Ф.Н. Оценка интенсивности и нормирование эрозионных потерь почвы в Центрально-Черноземном районе на основе бассейнового подхода // Научные ведомости БелГУ. Сер. Естественные науки. 2014. Т. 27. № 10. С. 125–132.
 20. Сурмач Г.П. Опыт расчета смыва почв для построения комплекса противоэрозионных мероприятий // Почвоведение. 1979. № 4. С. 92–104.
 21. Швец Г.И. Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 184 с.
 22. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю. Влияние антропогенных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы Санкт-Петербург: Наука, 2002. 152–164 с.
 23. Эрозионно-русловые системы / Под ред. Р.С. Чалова и др. М.: Инфра-М, 2017. 702 с.
 24. Bivand R., Keitt T., Rowlingson B., Pebesma E., Sumner M., Hijmans R.J., Rouault E., Warmerdan F., Ooms J., Rundel C. Package “rgdal”: Bindings for the Geospatial Data Abstraction Library <https://cran.r-project.org/web/packages/rgdal/rgdal.pdf>
 25. Bosco C., De Rigo D., Dewitte O., Poesen J., Panagos P. Modelling soil erosion at European scale: Towards harmonization and reproducibility // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2015. № 2(15). P. 225–245. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-225-2015>
 26. Burrough P.A., McDonnell R.A., Lloyd C.D. Principles of geographical information systems. Oxford: Oxford University Press, 2015. 190 p.
 27. Danielson J.J., Gesch D.B. Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010) // Open-File Report 2011–1073. <https://pubs.usgs.gov/of/2011/1073/pdf/of2011-1073.pdf>
 28. Finley A., Banerjee S. Package MBA: Multilevel B-spline Approximation. <https://cran.r-project.org/web/packages/MBA/MBA.pdf>
 29. Golosov V., Koiter A., Ivanov M., Maltsev K., Gusarov A., Sharifullin A., Radchenko I. Assessment of soil erosion rate trends in two agricultural regions of European Russia for the last 60 years // J. Soils Sediments. 2018. № 12(18). P. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2032-1>
 30. Golosov V., Yermolaev O., Litvin L., Chizhikova N., Kiryukhina Z., Safina G. Influence of climate and land use changes on recent trends of soil erosion rates within the Russian Plain // Land Degradation and Development. 2018. № 8(29). P. 2658–2667. <https://doi.org/10.1002/ldr.3061>
 31. Golosov V., Yermolaev O., Rysin I., Vanmaercke M., Medvedeva R., Zaytseva M. Mapping and spatial-temporal assessment of gully density in the Middle Volga region, Russia // Earth Surface Processes and Landforms. 2018. № 43. P. 2818–2834. <https://doi.org/10.1002/esp.4435>
 32. Groisman P.Y., Knight R.W., Easterling D.R., Karl T.R., Hegerl G.C., Razuvaev V.N. Trends in Intense Precipitation in the Climate Record // J. Climate. 2005. № 9(18). P. 1326–1350. <https://doi.org/10.1175/JCLI3339.1>
 33. Grum B., Woldearegay K., Hessel R., Baartman J.E.M., Abdulkadir M., Yazew E., Kessler A., Ritsema C.J., Geissen V. Assessing the effect of water harvesting techniques on event-based hydrological responses and sediment yield at a catchment scale in northern Ethiopia using the Limburg Soil Erosion Model (LISEM) // Catena. 2017. № 159. P. 20–34. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.07.018>
 34. Karydas C.G., Panagos P., Gitas I.Z. A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics // Int. J. Digital Earth. 2014. № 3(7). P. 229–250. <https://doi.org/10.1080/17538947.2012.671380>
 35. Kumar P.S., Praveen T.V., Prasad M.A. Simulation of Sediment Yield Over Un-gauged Stations Using MUSLE and Fuzzy Model // Aquatic Procedia. 2015. № 4. P. 1291–1298. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.168>
 36. Morgan R.P.C., Morgan D.D.V., Finney H.J. A predictive model for the assessment of soil erosion risk // J. Agricultural Engineering Res. 1984. № 30. P. 245–253. [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(84\)80025-6](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(84)80025-6)
 37. Morgan R.P.C., Quinton J.N., Smith R.E., Govers G., Poesen J.W.A., Auerswald K., Chisci G., Torri D., Styczen M.E. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments // Earth Surface Processes and Landforms. 1998. № 6(23). P. 527–544. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199806\)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199806)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5)
 38. Nachtergaele F.O., Petri M., Biancalani R., Lynden G. van, Velthuisen H. van, Bloise M. Global Land Degradation Information System (GLADIS), an information database for land degradation assessment at global level. Version 1.0. Rome, 2011. http://www.fao.org/nr/lada//index.php?option=com_content&view=article&id=161&itemid=113&lang=en
 39. Oldeman L.R. The extent of human induced soil degradation. Published in ISRIC Bi-Annual Report. 1991–1992. P. 19–36. <http://edepot.wur.nl/299739>
 40. Oost K.V., Quine T.A., Govers G., Gryze S.D., Six J., Harden J.W., Ritchie J.C., McCarty G.W., Heckrath G., Kosmas C., Giraldez J.V., Silva J.R.M. da, Merckx R. The Impact of Agricultural Soil Erosion on the Global

- Carbon Cycle // *Science*. 2007. № 5850(318). P. 626–629. <https://doi.org/10.1126/science.1145724>
41. Panagos P., Borrelli P., Poesen J., Ballabio C., Lugato E., Meusburger K., Montanarella L., Alewell C. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe // *Environ. Sci. Policy*. 2015. № 54. P. 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
 42. Pieri L., Bittelli M., Wu J.Q., Dun S., Flanagan D.C., Pisciotta P.R., Ventura F., Salvatorelli F. Using the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model to simulate field-observed runoff and erosion in the Apennines mountain range, Italy // *J. Hydrology*. 2007. № 1(336). P. 84–97. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.12.014>
 43. Quijano L., Beguería S., Gaspar L., Navas A. Estimating erosion rates using ¹³⁷Cs measurements and WATEM/SEDEM in a Mediterranean cultivated field // *Catena*. 2016. № 138. P. 38–51. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.009>
 44. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington: U.S. Government Printing Office, 1997. 384 p.
 45. Shrestha D.P., Jetten V.G. Modelling erosion on a daily basis, an adaptation of the MMF approach // *Int. J. Appl. Earth Observation and Geoinformation*. 2018. № 64. P. 117–131. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.09.003>
 46. Stolbovoi V., Fischer G. A New Digital Georeferenced Database of Soil Degradation in Russia // *Advances in Geoecology*. 1998. № 31. P. 143–152.
 47. Vigiak O., Malagó A., Bouraoui F., Vanmaercke M., Poesen J. Adapting SWAT hillslope erosion model to predict sediment concentrations and yields in large Basins // *Sci. Total Environ*. 2015. № 538. P. 855–875. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.095>
 48. Walling D.E. The sediment delivery problem // *J. Hydrology*. 1983. № 1(65). P. 209–237. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90217-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90217-2)
 49. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington: U.S. Government Printing Office, 1978. 67 p.
 50. Yermolaev O.P., Mukharamova S.S., Maltsev K.A., Ivanov M.A., Ermolaeva P.O., Gayazov A.I., Mozzherin V.V., Kharchenko S.V., Marinina O.A., Lisetskii F.N. Geographic Information System and Geoportal “River basins of the European Russia” // *IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci*. 2018. V. 107. P. 012108 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/107/1/012>

Potential Soil Loss from Erosion on the Arable Land in the European Part of Russia

K. A. Maltsev^{1,*} and O. P. Yermolaev¹

¹Kazan Federal University, Institute of Ecology and Environment, Department of Landscape Ecology, Kazan, 420000 Russia

*e-mail: mlcvkirill@mail.ru

Quantitative assessment of the potential soil loss on the arable land in the European part of Russia (4 million km²) was performed at the regional level of generalization corresponding to a scale of 1 : 1 M. Mathematical modeling based on the use of the equation for calculating potential soil losses from erosion, developed in the research laboratory of soil erosion and channel processes of Moscow State University was applied for this purpose in combination with geoinformation technologies. The calculations were performed for a raster model of representation of spatial data, including slope angles, slope lengths, soil properties, rainstorm precipitation, layer of snowmelt runoff, intra-annual distribution of rainfall, and land use types. New data were obtained on the erosional soil loss during the periods of snowmelt runoff and rainstorm runoff and on the total annual loss. An electronic map of erosional soil losses on the arable land of the European part of Russia was developed. The average soil losses reach 11 t/ha per year under black fallow and 3.3 t/ha per year under crops with their soil-protective capacity. About a half of the territory is located under conditions of the potential soil loss of less than 0.5 t/ha per year, whereas on the rest of the territory soil loss of 10 to 15 t/ha per year predominates. The rates of soil erosion on arable land in the European part of Russia decrease in the direction from the taiga-forest to the steppe landscape zones. The belt of the maximum erosion intensity extends in the sub-latitudinal direction within the subzone of mixed and broadleaved forests with a very high percent of plowed land. In addition, potential erosional soil losses were determined for 50 subjects of the Russian Federation in the study area for the conditions of clean fallow and agrocenoses.

Keywords: soil water erosion, mapping of soil erosion