

ФАКТОРЫ ЭРОЗИИ ПОЧВ В МАКРОРЕГИОНЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ, ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ

© 2025 г. О. П. Ермолаев^а, С. С. Мухарамова^а, К. А. Мальцев^а,
А. Р. Полякова^а, * (<https://orcid.org/0009-0000-5249-8232>), А. А. Савельев^а

^аКазанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008 Россия

*e-mail: zakieva.alika@mail.ru

Поступила в редакцию 05.04.2024 г.

После доработки 28.09.2024 г.

Принята к публикации 30.09.2024 г.

Проведена количественная оценка факторов эрозии почв и интенсивности эрозии от ливневого и талого стока на большей части Европейской территории России за 2014–2019 гг. на основе универсального уравнения потери почв USLE/RUSLE с пространственным разрешением 250 м. Результаты обобщены и картографически представлены в геосистемах бассейнов малых рек. Разработан новый подход моделирования эрозионного потенциала осадков (R-фактора) с использованием внутрисуточных данных об осадках. С использованием метода GAM разработана модель эрозионной активности дождя, объясняющая 87% изменчивости данных. Разработана новая методика детектирования почвозащитного фактора растительности (C-фактора) по данным дистанционного зондирования Земли. Новые результаты по C-фактору получены на основе многовременных спутниковых данных о плотности растительности, о спектральных вегетационных индексах и фенологических метриках. В качестве актуальных данных о запасах воды в снеге для определения интенсивности эрозии почв от талого стока использованы данные Snow Water Equivalent программы Copernicus. Годовая интенсивность эрозии почв (от ливневого и талого стока) в целом по всей территории незначительная: в среднем 0.6 т/га в год, медиана 0.02 т/га в год. На распаханых землях бассейнов эти величины выше: 2.4 и 1.6 т/га в год соответственно.

Ключевые слова: USLE/RUSLE, фактор R, фактор C, рекуррентные нейронные сети, дистанционное зондирование, бассейновый подход, интенсивность эрозии, ливневой смыв, талый смыв

DOI: 10.31857/S0032180X25020097, **EDN:** COOELO

ВВЕДЕНИЕ

Опубликованные результаты современных исследований, посвященные количественной оценке факторов эрозии почв и ее интенсивности для Европейской территории России (ЕТР), очень разнородны по степени пространственной детальности, методам и времени. Так же как обобщения этих данных на бассейновые геосистемы. В основном все результаты для этой большей территории получены с низкой пространственной детальностью. Как правило, оценки факторов и интенсивности эрозии обобщены либо на укрупненные по условиям рельефа морфологические районы, либо на субъекты РФ, либо определены только для пахотных земель [14, 30, 39, 52]. Важно

отметить требования к актуальности и реалистичности данных, используемых в модельных расчетах факторов эрозии. На это особо обращают внимание исследователи, каждый раз публикуя на один и тот же макрорегион мира обновленные данные по факторам эрозии и ее интенсивности, а также методам их оценки и прогноза [29, 45, 52, 74]. В настоящей статье основное внимание отводится новым результатам (в том числе методическим), уточняющим и актуализирующим ранее полученные оценки [6, 17, 46]. Рассматривается методика и результаты оценки факторов эрозии почвы и ее интенсивности в первую очередь на возвышенно-равнинных ландшафтах ЕТР. В основном этот макрорегион включает Русскую равнину и Кольско-Карельскую физико-географическую страну. В силу

различных причин (отсутствия исходных данных для определения параметров эрозии, временной период и др.) здесь не представлены результаты оценок в Калининградской области.

Цель работы — получение современных и более реалистичных оценок факторов почвенной эрозии: эрозионного потенциала дождевых осадков, почвозащитной роли растительности, а также запасов воды в снеге. Проведенные оценки с учетом размеров территории базируются на максимально высоком уровне пространственной детальности: все значения определяются в ячейках раstra с шагом 250 м и обобщаются на лучшие, с точки зрения интерпретации эрозионного процесса, геосистемные образования — бассейны малых рек. С учетом пространственной детальности привлекаемых исходных данных результаты соответствуют региональному уровню генерализации (1 : 500 000). Отметим, что полученные результаты планарно (без пропусков) покрывают всю территорию исследования, где происходят или потенциально могут происходить процессы эрозии почв (пахотные земли, луговые сообщества, лесные формации).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является почвенный покров, а предметом исследования — факторы и интенсивность эрозии почвы от ливневого и талого стока на ЕТР.

Территория исследования. Макрорегион исследования по ландшафтному районированию включает Восточно-Европейскую равнину, а на северо-западе — Кольско-Карельскую физико-географическую страну [19]. Выбор этого макрорегиона (~3.5 млн км²) обусловлен продолжительной и интенсивной сельскохозяйственной деятельностью в зоне наиболее плодородных почв. Здесь проживает 2/3 населения страны. Природные условия, на фоне которых идут процессы эрозии почвы, представлены на геопортале “Речные бассейны Европейской России” [3, 73] (рис. S1). Приведем краткую их характеристику. Почти 37% территории расположено на высотах 120–180 м. Средняя высота рельефа 140 м. Большая часть склонов бассейнов рек имеет уклоны от 0.5° до 1.5° (около 60%), уклоны менее 0.5° занимают 14% территории, крутые склоны — менее 0.5%. Доминируют склоны со средней длиной 500–700 м (69%). Характерной чертой климата является зональное распределение климатических элементов, а также несоразмерность тепла и влаги в различных ее частях. Распределение температурных характеристик имеет ярко выраженный зональный характер. Так, по среднемесячным метеоданным последних 50 лет, средняя годовая температура изменяется от –8°C в северо-восточной части ЕТР до +12–14°C на побережье Черного моря и Прикаспийской низменности.

Годовое количество осадков имеет максимум в западной части региона (600 мм, с локальными максимумами до 750 мм) с тенденцией их уменьшения в северном и особенно в юго-восточном направлении (200–300 мм). В гранулометрическом составе почв доминируют глинистые и тяжелосуглинистые почвы (61%), на легкосуглинистые и среднесуглинистые приходится 19 и 14% соответственно. Полоса зоны интенсивной распашки земель коррелирует с границами лесостепных и степных ландшафтов (рис. S1).

Подходы к моделированию. Оценка потенциальных эрозионных потерь почвы выполнена с использованием эмпирических математических моделей, оценивающих эрозию почвы как от дождевого (ливневого) стока, так и при таянии снега. Оценка интенсивности эрозии почвы за период ливневого поверхностного стока выполнена на базе модели, даваемой универсальным уравнением потерь почвы (USLE/RUSLE) [68] — смыв почвы W_r (т/га в год) определяется композицией факторов эрозии:

$$W_r = R K L S C P, \quad (1)$$

где R — фактор осадков (эрозионный потенциал дождевых осадков); K — фактор эродированности почвы; LS — фактор рельефа (эрозионный потенциал рельефа); C — фактор растительности (хозяйственно-агрономический); P — фактор эффективности противоэрозионных мер (не учитывался).

Для оценки потерь почвы от стока талых вод применена методика научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов МГУ (НИЛЭПиРП МГУ) [11] (значительно модифицированная методика Государственного гидрологического института) — эрозионные потери почвы W_s (т/га в год) моделируются зависимостями от факторов талого смыва:

$$W_s = f_1(L, K, H) C_s f_2(S), \quad (2)$$

где L — длина склона (м); K — фактор эродированности почвы (т/га/ед. эрозионного потенциала осадков); C_s — фактор растительности в период снеготаяния (безразмерный); S — уклон склона (тангенс угла наклона); H — слой поверхностного склонового стока во время снеготаяния (мм), определяемый величинами максимальных предвесенних запасов воды в снеге (H_s , мм) и коэффициентом стока в период снеготаяния (k_s , безразмерный). Коэффициент стока в этой модели зависит от уклона склона S : $k_s = D S^E$, где параметры D (безразмерный) и E (безразмерный) задаются в зависимости от ГМС почвы (глины, тяжелые суглинки, суглинки, супеси) и от природной зоны (лесная, лесостепь, степь) [11].

Годовую интенсивность почвенной эрозии W (т/га в год) получаем суммированием интенсивностей смыва почв при ливневом и при талом стоке:

$$W = W_r + W_s. \quad (3)$$

В качестве операционно-территориальных единиц анализа и модельных расчетов использовали ячейки растровой сетки с шагом 250 м (в равновеликой проекции Альберса), покрывающей исследуемую территорию. Результирующие оценки факторов эрозии и интенсивности эрозии почвы обобщаются на бассейны малых рек ЕТР.

Р-фактор. Эрозионный потенциал дождевых осадков является движущей силой процессов водной эрозии почвы. Он определяется как сумма эрозионной активности отдельных дождей, выпавших за заданный период (месяц, год). Эрозионная активность отдельного дождя определяется в USLE/RUSLE как произведение кинетической энергии дождя и его максимальной 30-минутной интенсивности [68]. Она рассчитывается на основе данных гигетометра (плювиографа) либо регистрации осадков через короткие промежутки времени (1–60 мин) в течение нескольких лет [27, 51, 52, 59, 63, 74, 75, 76]. Количество таких датчиков (с высоким временным разрешением) невелико, эти данные сложно получить в большом масштабе, и они имеют короткие периоды наблюдения. Поэтому большинство исследований с широким пространственным охватом связано с разработкой и применением методов оценки R-фактора на основе более доступных данных об осадках с грубым временным разрешением (суточные, месячные, годовые) [27, 31, 34, 55, 60, 70, 74, 77]. Общий подход заключается в разработке эмпирических взаимосвязей между R, рассчитанным по ограниченному количеству данных с высоким разрешением, и данными об осадках с низким разрешением (суточными, месячными или годовыми). Как правило, связь между R и количеством осадков описывается степенной зависимостью [62], а при наличии суточных или месячных данных о дождевых осадках в модель иногда включают синусоидальную функцию, отражающую годовой цикл параметров степенного закона [26, 31, 70, 76, 77]. Известно, что использовать такие аппроксимирующие уравнения надо с большой осторожностью — уравнения, разработанные для конкретного региона, могут быть неприменимы в других условиях, параметры моделей должны быть как минимум откалиброваны до ее переноса в другую зону [50, 51, 70]. Помимо этого, такие модели не могут отразить значительное влияние на R изменения доли осадков высокой интенсивности при тех же суммарных величинах. Наш подход предполагает моделирование R-фактора с использованием внутрисуточных данных об осадках. Эти данные могут предоставить

больше информации об экстремальных осадках, и это делает их лучшей альтернативой для оценки R, по сравнению с годовыми, месячными и суточными данными. Подход описывается так:

1) Для метеостанций, обеспеченных данными об осадках с высоким временным разрешением — данными плювиографов — рассчитывается эрозионная активность отдельных дождей по USLE/RUSLE (как произведение кинетической энергии дождя и его максимальной 30-минутной интенсивности: $R_s = E I_{30}$).

2) На основе этих результатов и с использованием метода обобщенно-аддитивных моделей (Generalized Additive Model, **GAM**) [40] строится модель статистической зависимости эрозионной активности дождя R_s от характеристик места и времени его выпадения (координаты, высота в рельефе, дата начала дождя — номер дня в году) и характеристик, доступных для внутрисуточных данных об осадках (сумма осадков дождя, средняя интенсивность дождя).

3) Для метеостанций, обеспеченных внутри-суточными данными об осадках, выделяются “модельные” дожди (как непрерывная последовательность сроков наблюдения, в каждом из которых зафиксированы дождевые осадки) и оценивается их эрозионная активность по разработанной GAM-модели.

4) На этих метеостанциях суммированием эрозионной активности отдельных “модельных” дождей (ливней со слоем осадков >10 мм) рассчитывается R-фактор для заданного временного промежутка (месяца, года) и выполняется среднее многолетнее обобщение.

5) Моделирование пространственного распределения среднеемноголетнего годового R-фактора на исследуемой территории основано на следующих предположениях. Прежде всего, это зависимость R от среднеемноголетнего количества осадков в теплый период года (дождевых осадков). Модель линейной регрессии среднеемноголетнего R на количество осадков в теплый период года объясняет 80% изменчивости оценки среднеемноголетнего годового R на метеостанциях. Это позволяет рассматривать количество осадков в теплый период года как ковариату для R и представить R как произведение суммы осадков в теплый период года и некоего коэффициента, значение которого отражает энергетические свойства осадков, характерные для конкретной территории. По данным метеостанций изучили влияние на этот коэффициент различных факторов и показали, что он значимо зависит от географического положения (координат), коэффициент детерминации 88%. GAM-модель этой зависимости дает возможность получить оценку коэффициента в каждой точке изучаемого географического пространства. Эту оценку можно

рассматривать как матожидание коэффициента (гладкий пространственный тренд). В соответствии с принципами геостатистики тренд вычитается из значений коэффициента на метеостанциях, после чего проводится пространственная интерполяция разницы методом Multilevel B-spline Approximation (МВА) [44]. Преимуществом МВА является воспроизведение деталей на всех масштабных уровнях, которое обусловлено иерархией масштабов, в которых последовательно выполняется интерполяция. Результирующую оценку R-фактора в произвольной точке исследуемой территории получаем как произведение прогнозного коэффициента (с учетом интерполированной поправки) на количество осадков в теплый период года. При этом количество осадков в произвольной точке (не на метеостанции) получено интерполяцией данных метеостанций.

Предлагаемый подход к оценке R-фактора является новым как в плане метода оценки R-фактора на метеостанциях, так и применяемого метода интерполяции и впервые опробуется для территории исследования.

Для реализации заявленного подхода в распоряжении имелись плювиографические данные, полученные в разные периоды наблюдений (с 1961 по 1989 гг.) на 32 станциях, расположенных на ЕТР (рис. S1в). Всего использовано 4221 плювиограмм дождей. В качестве внутри суточных данных об осадках в работе использованы срочные данные о количестве осадков на метеостанциях Росгидромета. Данные загружены с официального сайта Федерального государственного бюджетного учреждения “Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных” [21]. На ЕТР (со 100-километровым буфером) расположено 189 метеостанций со срочными данными об осадках (за период наблюдений 1966–2020 гг.) (рис. S1в). Срочные данные — это данные о количестве осадков за время между измерениями. Число измерений осадков в сутки составляло 4 раза в период 1966–1985 гг. и 2 раза с 1986 г.

К-фактор. Оценка пространственного распределения К-фактора эродированности почвы для ЕТР проведена с привлечением цифровых геоданных о характеристиках почвенного покрова. В качестве основного источника информации был выбран наиболее авторитетный на настоящее время ресурс — “Единый государственный реестр почвенных ресурсов России (ЕГРПР)” [5], а именно база данных (БД) Soil, в том числе векторный слой почвенной карты [22], файл с данными почвенных разрезов, а также характеристики почв, представленные в семантической части раздела “Почвы” на ЕГРПР. Всего на карте для ЕТР представлены 7692 контура с 176 подтипами почв, а в БД Soil

содержатся данные 376 почвенных разрезов, характеризующих 114 подтипов почв.

В качестве модели для оценки К-фактора за основу взята математическая аппроксимация стандартной номограммы [68] с учетом более поздних корректировок [59, 61], которая в единицах измерения СИ (т га ч/(МДж га мм)) имеет следующий вид:

$$K = ((2.1((d(100 - e))^{1.14}) 0.0001 (12 - a) + 3.25 (b - 2) + 2.5 (c - 3)/100) 0.1317. \quad (4)$$

Формула используется для оценки эродированности пять параметров почвы (a — процент органического вещества, d — процент частиц размером 0.002–0.1 мм, e — процент частиц размером <0.002 мм, b — класс структуры и c — класс водопроницаемости) и прописана в модели USLE/RUSLE, а также в методических разработках НИЛЭПиРП МГУ [11].

На первом этапе значение К-фактора оценивали в точках почвенных разрезов, где параметры номограммы определяли на основе описания разреза в БД Soil. При отсутствии в БД тех или иных необходимых данных для того или иного разреза, а также для почв, не представленных в разрезах, информацию о характеристиках почвы брали из семантической части ЕГРПР. Чтобы избежать недооценки эродированности почв, богатых органическим веществом, для параметра a применялся верхний предел 4% [68]. При определении параметров d и e по данным почвенных описаний применяли понижающий и повышающий коэффициенты, учитывая отличие в диапазонах размеров частиц в номограмме и в исходных данных. При $d > 68\%$ корректировался первый член в уравнении номограммы [63].

На следующем этапе моделировали пространственное распределение К-фактора для исследуемой территории. Здесь был применен следующий подход. Полигону почвенной карты присваивали значение K , обобщенное по значениям K на ближайших почвенных разрезах с тем же типом почвы. Для этого по геокодированным точкам почвенных разрезов с фиксированным типом почвы строили диаграмму Вороного, а затем для каждого полигона почвенной карты с этим типом почвы определяли доли его площади, принадлежащей различным ячейкам диаграммы. Значение К-фактора для почвенного полигона рассчитывали взвешенным усреднением значений K на соответствующих разрезах, где веса — это доли площади полигона, принадлежащей ячейкам разрезов. Для части почвенных контуров с учетом их местоположения в бассейнах (с торфяными болотными, пойменными, глеевыми типами почв) значение K принимали равным нулю, поскольку на таких участках эрозия почв не проявляется, доминируют процессы аккумуляции.

Характеристики рельефа и LS-фактор. Оценка эрозионного потенциала рельефа (LS-фактора) базируется на ранее проведенных нами исследованиях [16, 46]. Пространственное моделирование LS для таких протяженных территорий как ЕТР невозможно без привлечения глобальных цифровых моделей рельефа (ЦМР). Рельеф ЕТР представлен несколькими свободно распространяемыми ЦМР. Это GMTED2010 [33] – 7.5 угловых секунд, MERIT v.1 [71], Viewfinder Panorama [47], TanDEM-x90 [67], Copernicus GLO-90 [32] – 3 угловые секунды, AW3D30 [64], ASTERGDEM v.2-3 [1], Copernicus DEM GLO-30 [32], FABDEM [41] – 1 угловая секунда. Учитывая размеры ЕТР и принятый в исследовании уровень генерализации, а также принцип сомасштабности исходных данных, оптимальной для решения поставленных задач является модель Global Multiresolution Terrain Elevation Data 2010 (**GMTED2010**) с пространственным разрешением 7.5 угл. сек, что составляет около 250 м для исследуемой территории. Эта модель создана с использованием 11-ти различных источников данных о рельефе Земли, в том числе SRTM и цифровых данных о высотах, полученных с использованием фотограмметрии. Отметим, что при оценке LS-фактора необходимо с осторожностью относиться к полученным значениям в пределах уплощенного типа рельефа, где ошибки модели GMTED2010 увеличиваются.

Полный обзор методов расчета LS-фактора дан в работах [12, 56]. Как в отечественных исследованиях, так и за рубежом чаще всего используют четыре методики [28]: RUSLE [35, 59]; USLE [68]; НИЛЭПиРП МГУ [11]; И.Д. Мура и Дж.Л. Нибера [48]. На основе результатов проведенных тестовых расчетов [16] была выбрана методика RUSLE [59] с оценкой фактора длины склонов с использованием площади дренируемого водосбора [35]. Ее применяли при оценке LS-фактора для зарубежной Европы [52], что дает возможность для сопоставления настоящих результатов с расчетами, полученными по Западной Европе.

С-фактор. Современную оценку пространственного распределения С-фактора для ЕТР проводили на основе анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) из космоса. Для этой цели привлечены научные продукты, полученные по спутниковым данным и доступные на сайтах USGS/NASA и Copernicus. Оценку С-фактора при ливневом смыве почв выполняли помесечно (как среднемесячная для “теплых” месяцев года) и отдельно (разными методами) на пахотных землях и на всех других видах земель (непахотных). Для разделения земель (пикселей) изучаемой территории на пахотные и непахотные использована карта наземных экосистем России TerraNorte RLC [2], созданная в Институте космических исследований РАН по данным спутниковых наблюдений MODIS

и представляющая основные типы земного покрова (разрешение 230 м).

Для оценки $C(i,j)$ (С-фактор в i -й месяц j -го года) на непахотных землях применен подход, описанный в работе Панагоса [52]. Метод учитывает влияние плотности растительности, количественно оцениваемой с помощью биофизического параметра F_{Cover} (разрешение 300 м), получаемого по спутниковым данным PROBA-V с частотой каждые 10 дней [69]. Для типов растительного покрова непахотных земель карты TerraNorte RLC были заданы диапазоны значений С-фактора $[C_{\min}, C_{\max}]$ в соответствии с наиболее цитируемыми литературными данными [49]. В каждом пикселе непахотных земель С-фактор в i -й “теплый” месяц j -ого года оценивался как $C(i,j) = C_{\max} + (C_{\min} - C_{\max}) F_{\text{cover}}(i,j)$, где $F_{\text{cover}}(i,j)$ усредненное за дни i -го месяца j -ого года значение F_{cover} (шаг 10 сут); C_{\min}, C_{\max} зависят от типа покрова в пикселе. Урбанизированные территории, водно-болотные угодья, водоемы, вечные снега и льды, выходы горных пород не учитываются при оценке (выделяются в класс “неэродированные земли”).

Для пахотных земель настоящий подход оценки С-фактора учитывает то, что в каждом пикселе его значение меняется от месяца к месяцу по мере фаз вегетации сельскохозяйственных культур и проводимых агротехнических мероприятий, а также от года к году вследствие севооборота и различия почвозащитных свойств разных сельскохозяйственных культур. Подход включает два этапа:

(1) для каждого j -го года по многовременным ДДЗЗ выполняется автоматизированное распознавание сельскохозяйственных культур, присутствующих на пахотных землях территории в j -м году;

(2) для i -го месяца j -го года выполняется модельная оценка С-фактора в пикселях пахотных земель с учетом сезонной динамики почвозащитных коэффициентов распознанных сельскохозяйственных культур с использованием F_{cover} и фенологических метрик, получаемых по ДДЗЗ.

Для распознавания состава сельскохозяйственных культур привлекаются продукты MOD13Q1, MYD13Q1 [36] – растры спектральных вегетационных индексов NDVI и EVI с пространственным разрешением 250 м, полученные по данным космической съемки прибором MODIS со спутников Terra и Aqua за вегетационный сезон j -го года (с шагом 8 сут). Обучающая выборка создана с использованием данных на территориях-аналогах: ряд регионов Канады с ландшафтно-климатическими условиями близкими к условиям ЕТР. Это открытые данные проекта Annual Crop Inventory [25], представленные как растры землепользования/земного покрова, включающие типизацию на различные сельскохозяйственных культуры. Обучающая выборка представляет собой

набор временных рядов, отражающих сезонную динамику вегетационных индексов NDVI и EVI по данным MODIS в эталонных пикселях распознаваемых сельскохозяйственных культур. В качестве метода автоматизированного распознавания использован один из современных методов машинного обучения — рекуррентные нейронные сети с долгосрочной и краткосрочной памятью (Long short-term memory, LSTM) [42], показавшие наилучшие результаты (перекрестная проверка дает процент правильного распознавания 94%) в сравнении с рядом других опробованных методов (Support Vector Machine, Deep Learning MultiLayer Perceptron, Random Forest). Обученный алгоритм LSTM применяется для пахотных земель ЕТР для каждого исследуемого года. На вход алгоритму подаются наборы растров MODIS с NDVI, EVI на изучаемую территорию за вегетационный сезон года. На результирующих растрах в пикселях пахотных земель представлены коды сельскохозяйственных культур в соответствующий год.

Следующий этап заключался в переходе от растра распознанных сельскохозяйственных культур к значениям С-фактора в пикселях пахотных земель в i -й месяц этого года. Предварительно, опираясь на литературные источники [23, 52, 54], для каждой сельскохозяйственной культуры заданы значения эрозионных индексов для 6-ти периодов теплой части года (1 — от основной обработки почвы до предпосевной обработки и сева; 2 — от сева до достижения всходами 10% проективного покрытия; 3 — до достижения 50% проективного покрытия; 4 — до достижения 80% проективного покрытия; 5 — далее до уборки; 6 — от уборки до основной обработки почвы). И по 4-м периодам — от начала вегетации до уборки — выполнена математическая аппроксимация зависимости эрозионных индексов каждой культуры от проективного покрытия с использованием сигмовидной функции $a/(1 + e^{(b-X)/c})$.

Далее для j -го года в каждом пикселе пахотных земель по фенологическим метрикам ежегодного продукта VNP22Q2, полученного по данным космической съемки прибором VIIRS со спутника Suomi NPP с разрешением 500 м [78], определяли даты начала и окончания вегетации в текущем году, которые послужили оценками дат начала 2-го и окончания 5-го периодов соответственно. Для i -го “теплого” месяца в пикселе рассчитывали доли (процент дней) трех временных диапазонов: до начала вегетации, в период вегетации и после ее окончания (например, в пикселе на территории Татарстана для января первая доля составляет 100%, вторая и третья — 0%, а для мая первая доля может составлять 20%, вторая 80%, третья 0%). В диапазон от начала вегетации до уборки (периоды 2–5) в качестве оценки проективного покрытия используется F_{cover} . Его значение в пикселе в эти дни месяца пересчитывали в значения

С-фактора с использованием сигмоида, параметры которого зависели от присутствующей в пикселе сельскохозяйственной культуры. В диапазоны месяца, соответствующие 1-му или 6-му периодам, в силу отсутствия информации о сроках основной обработки почвы и способах агротехники значения эрозионных индексов культур задавали в предположении отвальной вспашки вскоре после уборки (“пессимистичный” сценарий). С-фактор в i -й “теплый” месяц в пикселе оценивался как взвешенное среднее полученных значений С в три диапазона месяца: за дни до начала вегетации, за дни в период вегетации и за дни после ее окончания, где веса — это доли соответствующих диапазонов в i -м месяце. Несмотря на то, что такая модель не учитывает всех особенностей севооборотов, методов обработки земли и пр., она предусматривает возможность получать результаты для разных сценариев путем корректировки входных значений.

На заключительном шаге растры С-фактора пахотных земель и непашотных земель совмещали в единую мозаику, представляющую распределение С-фактора в i -й месяц j -го года на исследуемой территории. На их основе могут быть сделаны различные обобщения: годовая оценка С-фактора при ливневом стоке (для j -го года усредняются значения в “теплые” месяцы в пикселе); среднемноголетние помесечные оценки С-фактора; среднемноголетняя годовая оценка С-фактора при ливневом стоке. С-фактор в период снеготаяния оценивался в зависимости от типа земного покрова в пикселе как $C_s = C_{\text{max}}$.

Таким образом, разработанный новый подход к оценке С-фактора на основе анализа многовременных ДДЗЗ комбинирует автоматизированное распознавание сельскохозяйственных культур в пикселях пахотных земель (на основе анализа сезонного хода индексов NDVI и EVI MODIS) и помесечную оценку значений С-фактора с использованием спутниковых данных о плотности растительности и фенологических метриках. Отдельные аспекты настоящего подхода подробнее изложены в ряде публикаций [37, 43, 49].

Максимальные предвесенние запасы воды в снеге. Интенсивность эрозии почвы от талого стока зависит от слоя склонового стока в период снеготаяния, который, в свою очередь, среди прочего определяется запасами воды в снеге к началу весеннего снеготаяния. Для оценки запасов воды в снеге на больших территориях обычно привлекают справочные материалы в виде мелкомасштабной карты “Максимальные запасы воды в снеге к началу весеннего снеготаяния” на территорию бывшего СССР, построенной методом изолиний по данным климатических справочников 1960–1980-х гг. [18], а именно по данным предвесенних снегосъемок на полевых участках 860 метеостанций. Эта карта отражает ситуацию с запасами воды в снеге на конец–середину 80-х гг.

прошлого столетия и требует актуализации в связи с происходящими климатическими изменениями.

Относительно недавно в открытом доступе в рамках программы Copernicus, реализуемой Европейским космическим агентством, появился продукт Snow Water Equivalent (SWE), получаемый по спутниковым данным и содержащий ежедневные оценки содержания воды в снежном покрове за зимние периоды, начиная с 2006 г. по настоящее время, с пространственным разрешением ~ 5 км. Алгоритм определения запасов воды в снеге основан на обработке информации пассивных микроволновых каналов радиометров космического базирования, верифицированной по наземным измерениям глубины снега с метеорологических станций. Продукт SWE охватывает территории суши между 35° и 85° N, за исключением крупных пресноводных озер, горных районов и ледников [57, 65]. Качество SWE подтверждалось сравнением с независимыми данными на местности, собранными на снежных разрезах в поле в России, Финляндии и Канаде.

Новая пространственная оценка максимальных запасов воды в снеге к началу весеннего снеготаяния для ЕТР реализуется на основе обработки ежедневных растров SWE. Для j -го года в каждом пикселе территории анализируется временной ряд ежедневных значений SWE и определяется максимальное значение SWE в предвесеннюю дату. Далее выполняется обобщение для заданного интервала лет с формированием современной среднемноголетней оценки пространственного распределения максимальных предвесенних запасов воды в снежном покрове исследуемой территории.

Бассейны малых рек. Для реализации бассейнового подхода был использован векторный слой бассейнов малых рек ЕТР. Границы бассейнов выделены с использованием ЦМР GMTED2010 [33]

и модели гидрографической сети карт масштаба $1 : 1\,000\,000$. Методы и техника построения границ бассейнов подробно описана авторами в предыдущих работах [72, 73]. Всего для ЕТР векторный слой включает 53 865 объектов — бассейнов рек, в равнинных районах ЕТР их насчитывается 49 516. Средняя площадь выделенных речных бассейнов составляет около 75 км^2 .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результатом исследований являются новые оценки факторов и интенсивности эрозии почв для ЕТР. Разработанная методика определяет набор исходных данных, необходимых для оценок факторов почвенной эрозии, входящих в модели смыва от стока ливневых и талых вод, порядок, методы и процедуры расчетов для оценки факторов и итоговых показателей смыва, интерпретации полученных результатов, построения карт для отображения результатов. Эродируемость почвы (К-фактор) и характеристики рельефа (LS-фактор) в рамках моделей рассматривали как консервативные факторы, весьма слабо изменяющиеся во времени. Оценки факторов R и C, слоя поверхностного стока в период снеготаяния — это среднемноголетние оценки за современный период (2014–2019 гг.). Методика реализована средствами авторского программного обеспечения, созданного с использованием языков R [58] и Python [66].

Оценка R-фактора. В рамках заявленного подхода оценки R-фактора разработана GAM-модель статистической зависимости эрозионной активности дождя от внешних факторов, объясняющая 87% изменчивости данных (коэффициент детерминации). Как значимые предикторы в модель вошли характеристики времени и места выпадения дождя (номер дня в году, долгота, широта, высота

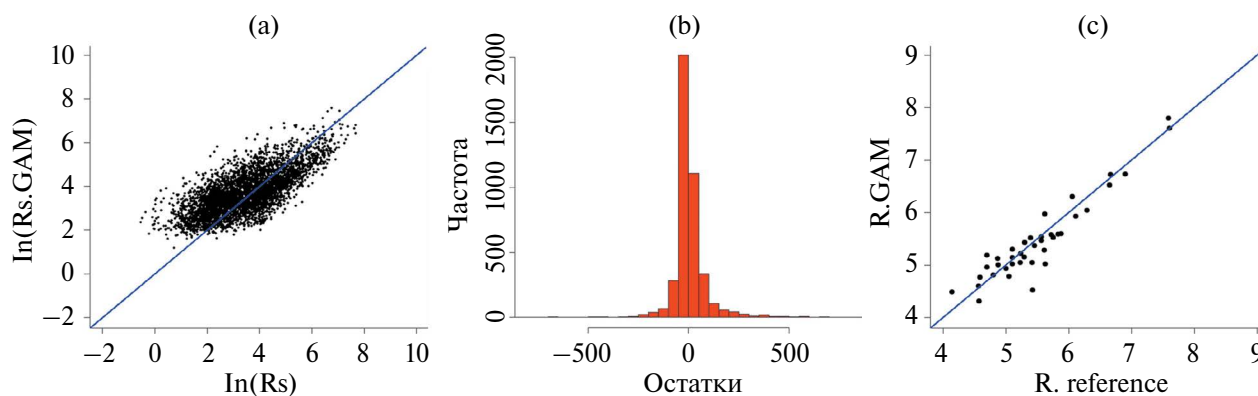


Рис. 1. Диаграммы, иллюстрирующие качество построенной GAM-модели и адекватность оценок R-фактора: (a) — значения логарифма эрозионной активности дождя, рассчитанной по плювиограммам, в сравнении с прогнозируемыми по GAM-модели; (b) — гистограмма частот значений остатков GAM-модели; (c) — модельные оценки R-фактора по сравнению с референсными по данным карты Global Rainfall Erosivity map [53].

рельефа), количество выпавших осадков, средняя интенсивность дождя. Нелинейную зависимость от внешних факторов моделировали с использованием сплайнов. На рис. 1а, 1б приведены диаграммы, иллюстрирующие качество GAM-модели логарифма эрозионной активности дождя. На основе этой модели выполнен прогноз эрозионной активности отдельных “модельных” дождей, и рассчитана среднемноголетняя оценка годового R-фактора на 189-ти метеостанциях ЕТР со срочными данными за 2014–2019 гг. Адекватность модельных оценок R-фактора оценивали путем их сравнения с референсными оценками R (годового среднемноголетнего) на 40 метеостанциях, использованными при построении карты Global Rainfall Erosivity map [53] с учетом периода обобщения. И настоящие, и референсные оценки R сделаны для периода 1961–1989 гг. Хорошее согласие модельных значений с референсными данными (коэффициент корреляции 0.978) иллюстрирует рис. 1с.

Далее на основе оценок R-фактора на метеостанциях и с использованием разработанного метода интерполяции получена современная оценка пространственного распределения среднемноголетнего годового R-фактора ливневой эрозии на исследуемой территории. Результат представлен на растровом слое (рис. 2а). Значения полученной оценки R-фактора на ЕТР варьируются в интервале от 26 до 4700, среднее значение 340, медиана 302 (МДж мм)/(га ч) в год. Без учета горных районов Кавказа диапазон значений R от 26 до 2500, среднее 320, медиана 299 (МДж мм)/(га ч) в год.

Оценка К-фактора. Результатом оценки пространственного распределения фактора эродированности почвы стал слой почвенных полигонов со значениями К-фактора, представленный в векторном формате. Для ЕТР значения полученной оценки К-фактора для эродируемых почв варьируются в интервале от 0.01 до 0.083, среднее значение 0.048 (т га ч)/(МДж га мм). Обобщенные для основных зональных типов почв ЕТР оценки К следующие: подзолистые – 0.061, дерново-подзолистые – 0.058, серые лесные – 0.045, черноземные – 0.026, каштановые – 0.040, солонцы – 0.050 (т га ч)/(МДж га мм). Значения эродированности уменьшаются от подзолистых и дерново-подзолистых почв к серым лесным и далее к черноземным почвам, а затем увеличиваются от черноземов к каштановым почвам и далее к солонцам. В географическом пространстве это соответствует увеличению значений фактора К к северу и югу от пояса черноземных почв (рис. 2б).

Оценка LS-фактора. Результат расчета эрозионного потенциала рельефа (LS-фактора) на базе ЦМР GMTE2010 также представлен в виде растрового слоя (рис. 2с). Среднее значение LS для ЕТР около 1, медиана 0.3, варьируется в диапазоне от 0 до 99, при этом 99%-ный квантиль равен

16. Если не рассматривать экстремальные условия горных районов Кавказа, то среднее значение LS – 0.64, 99%-ный квантиль – 6.0.

Оценка С-фактора. Разработанная методика оценки С-фактора на основе ДД33 была реализована для периода 2014–2019 гг. Согласно методике, на первом этапе по многовременным ДД33 MODIS выполняли автоматизированное распознавание сельскохозяйственных культур, присутствующих на пахотных землях территории в каждом году. Список распознаваемых сельскохозяйственных культур включал культуры, представленные как на исследуемой территории, так и на территориях-аналогах – зернобобовые, кукуруза, яровые злаковые, озимые злаковые, подсолнечник, сахарная свекла, картофель, гречиха, земли под паром, многолетние травы. Точность распознавания объектов классов сельскохозяйственных культур методом LSTM по данным на территориях-аналогах представлена в табл. 1. Для изучаемой территории качество распознавания оценивали путем сравнения результатов распознавания с открытыми данными Федеральной службы государственной статистики (Росстат) [20], а именно для 1120 муниципальных районов ЕТР сравнивали площади под сельскохозяйственными культурами, доминирующими на пашнях ЕТР, полученные по результатам распознавания и по данным Росстата. Статистические характеристики ошибок (разности между реальными и смоделированными площадями

Таблица 1. Точность автоматизированного распознавания сельскохозяйственных культур по временным рядам NDVI, EVI (ДД33 MODIS) методом LSTM на территориях-аналогах по результатам перекрестной проверки

Сельскохозяйственные культуры	Правильность распознавания, %
Яровые злаки	96.4
Озимые злаки	93.1
Зернобобовые	79.5
Кукуруза	94.5
Подсолнечник	95.4
Сахарная свекла	99.0
Картофель	98.7
Гречиха	99.0
Многолетние травы	95.1
Пар	87.0
В среднем (с учетом представительности сельскохозяйственных культур)	94.0

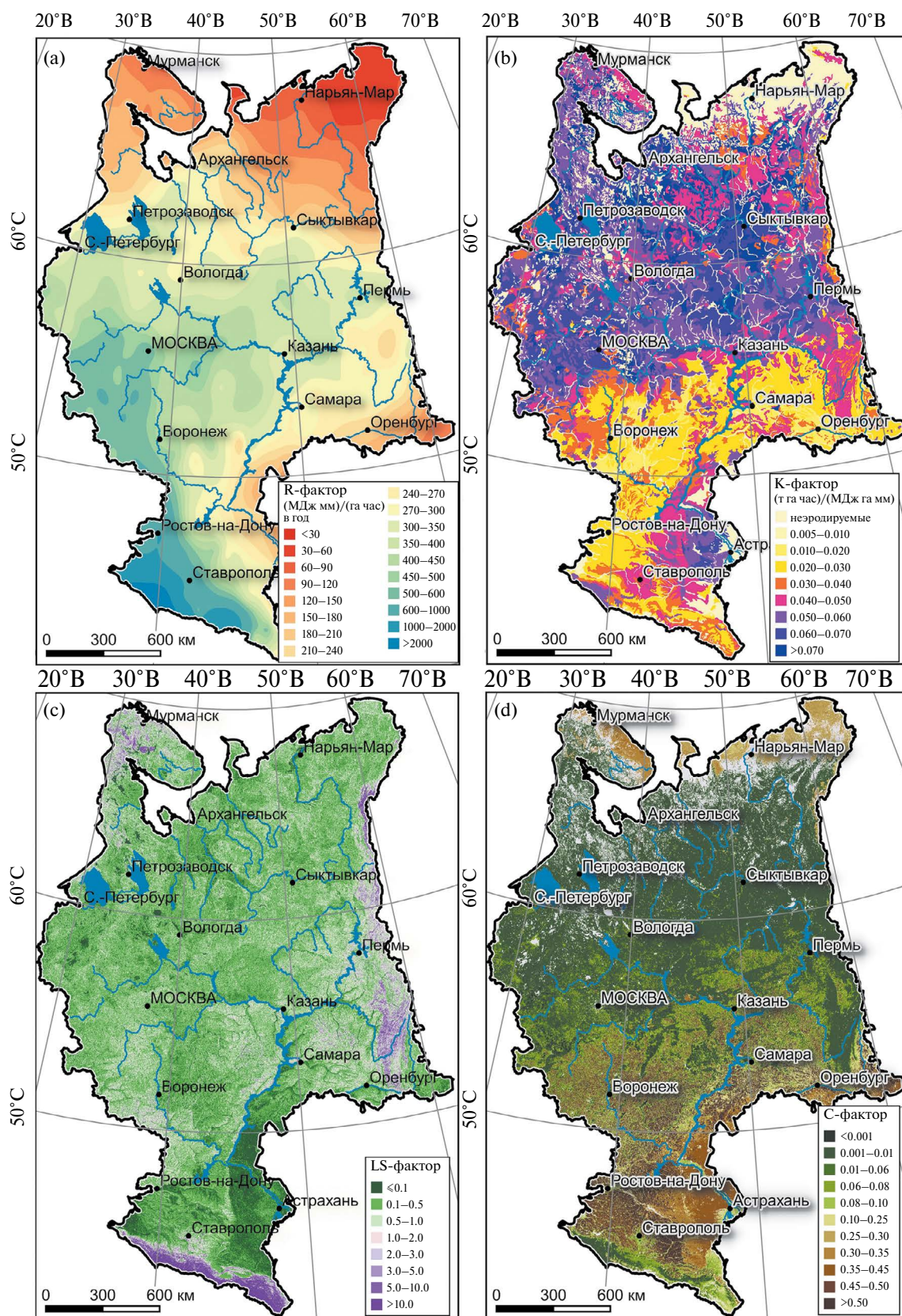


Рис. 2. Пространственное распределение факторов эрозии почв в макрорегионе ЕТР: (а) – R-фактор; (б) – K-фактор; (с) – LS-фактор; (д) – C-фактор (среднепогодная оценка за период 2014–2019 гг.).

Таблица 2. Показатели согласия результатов распознавания сельскохозяйственных культур по временным рядам NDVI, EVI (ДД33 MODIS) с данными Росстата о посевных площадях в муниципальных районах субъектов РФ на ЕТР, тыс. га

Культуры	Среднее ошибки, <i>ME</i>	Медиана ошибки, <i>MdE</i>	Стандартная ошибка оценки, <i>SE</i>	Коэффициент корреляции Пирсона
Яровые злаки	2.2	1.70	6.7	0.90
Озимые злаки	0.2	0.06	8.1	0.91
Зернобобовые	−0.7	−0.15	2.2	0.60
Общая площадь пашни	−4.8	−0.10	18.0	0.96

Примечание.

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (s_{real,i} - s_{model,i})}{N},$$

$$MdE = \text{median}_{i=1..N} (s_{real,i} - s_{model,i}),$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N ((s_{real,i} - s_{model,i}) - ME)^2}{N - 1}},$$

где N — количество муниципальных районов, $s_{real,i}$ и $s_{model,i}$ — реальные и модельные площади пашни, занятые определенной культурой в i -м районе.

посевов в районах), обобщенные за 2014–2019 гг., приведены в табл. 2. Корреляция результатов с данными Росстата достаточно высокая, медианы и средние значения разностей площадей близки к нулю. На рис. S2 показаны гистограммы частот этих ошибок, а также в качестве примера для сравнения приведены карты площадей, занятых определенной категорией сельскохозяйственных культур в муниципальных образованиях в 2016 г., согласно данным Росстата и результатам дешифрирования. Качество распознавания (дешифрирования) можно расценить как вполне приемлемое для наших целей.

Далее с использованием спутниковых продуктов за 2014–2019 гг. (F_{cover} — доля поверхности, покрытой любым типом растительности, шаг 10 сут; VNP22Q2 — ежегодные показатели фенологии растительности) получены помесечные и годовые оценки С-фактора при дождевой (ливневой) эрозии для 2014–2019 гг., а также среднесезонные помесечные оценки и среднесезонная годовая оценка С-фактора (в теплый период, при ливневом стоке). Оценки представлены на растровых слоях с пространственной детальностью 250 м (рис. 2d). Результаты с такой пространственной и временной детальностью впервые получены для ЕТР. Значения среднесезонного годового С-фактора на ЕТР варьируют в интервале от 0.0006 до 0.81, среднее значение 0.11, медиана 0.002. Для агроценозов ЕТР среднее значение 0.40, медиана 0.47.

Оценка максимальных предвесенних запасов воды в снеге. Современная оценка максимальных запасов воды в снеге к началу весеннего снеготаяния

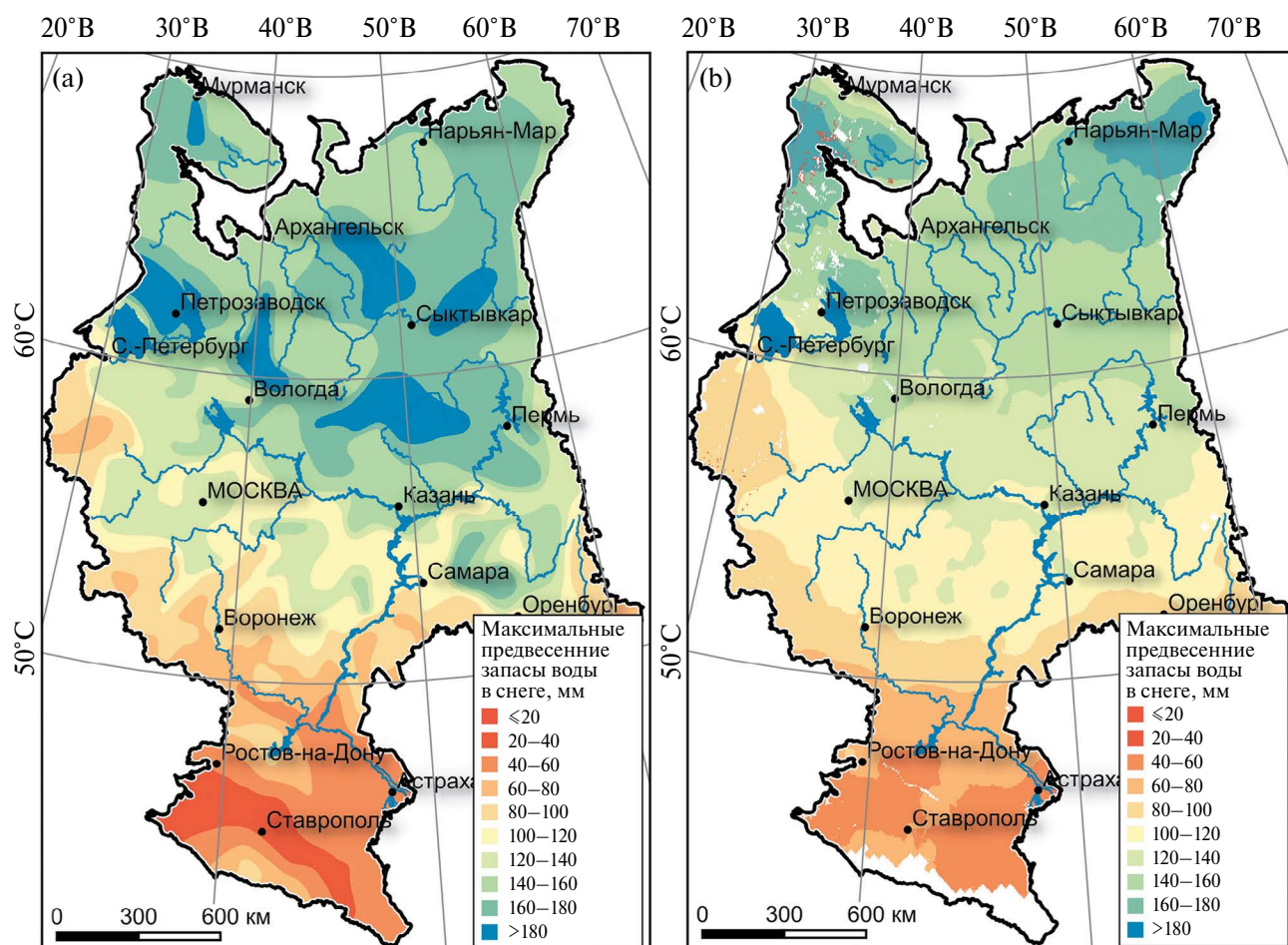
для ЕТР реализована на основе обработки ежедневных спутниковых продуктов SWE за 2006–2019 гг. На рис. 3 представлено картографическое отображение полученной оценки, а также для сравнения показана “историческая” оценка по данным климатических справочников 1960–1980 гг. В табл. 3 сравниваются значения этих оценок, обобщенные (усредненные) по ландшафтным зонам равнинной части ЕТР. Во всех ландшафтных зонах ЕТР за этот период запасы воды в снеге уменьшились. Самое значительное уменьшение наблюдается в южно-таежной подзоне и в зоне смешанных и широколиственных лесов, где еще распашка земель довольно значительная (рис. S1b). Обращает на себя внимание существенное сокращение предвесенних запасов воды в снеге, а значит уменьшение талого стока и эрозии наблюдается в лесостепях и степях ЕТР, где пашня практически повсеместна. Среднее значение максимальных предвесенних запасов воды в снеге по всей территории ЕТР (без учета горных районов Кавказа, где отсутствуют спутниковые данные SWE) уменьшилось на 21% по отношению к “исторической” оценке (от 129 до 103 мм). Возможно, к этим цифрам надо относиться с некоторой долей осторожности, учитывая различия в методиках получения исходных данных.

Оценка темпов эрозии почв. На основе полученных современных оценок факторов почвенной эрозии проведены расчеты по соответствующим моделям смыва от стока ливневых осадков и от стока талых вод — формулы (1) и (2). Оценка годовой интенсивности почвенной эрозии

Таблица 3. Оценки максимальных предвесенних запасов воды в снеге в ландшафтных зонах ЕТР, мм

Ландшафтная зона	По данным климатических справочников 1960–1980 гг.	По данным SWE 2006–2019 гг.	Изменение, %*
Тундровые и лесотундровые	158	147	–7
Северотаежные	163	142	–13
Среднетаежные	168	128	–24
Южнотаежные	148	105	–29
Смешанные и широколиственные	126	94	–26
Лесостепные	108	89	–17
Степные	75	61	–20
Полупустынные и пустынные	48	42	–14

*Разность между современной и “исторической” оценками по отношению к “исторической”, %.


Рис. 3. Максимальные предвесенние запасы воды в снеге (мм): (а) — по данным 1960–1980 гг.; (б) — по данным SWE 2006–2019 гг.

(среднегодовое за 2014–2019 гг., soil loss rates, т/га в год) получена как сумма интенсивностей смыва при ливневом и при талом стоке — формула (3). Все результирующие оценки интенсивностей эрозии (ливневой, талой, годовой) рассчитаны на растровых сетках, покрывающих ЕТР (с линейным размером ячеек 250 м), с последующим их обобщением на бассейновые геосистемы малых рек ЕТР как по всей территории бассейна (рис. 4), так и отдельно для пахотных земель в пределах бассейна (рис. 5). Годовые темпы эрозии почв имеют следующие статистические характеристики (по выборке всех бассейнов исследуемой территории): среднее 0.6 т/га в год, медиана 0.02 т/га в год, 95%-ный перцентиль равен 2.7 т/га в год, 99%-ный — 8.6 т/га в год. В географическом пространстве интенсивность эрозии почв резко увеличивается на пахотных землях. Если в пределах бассейнов учитывать только пахотные земли, то значения статистик следующие: среднее — 2.4 т/га в

год, медиана — 1.6 т/га в год, 95%-ный перцентиль — 6.6 т/га в год, 99%-ный — 12.8 т/га в год.

Оценки факторов и темпов эрозии почв на пахотных землях, обобщенные по ландшафтным зонам и по субъектам РФ, приведены в табл. 4 и 5 соответственно. Результаты исследования в картографическом виде также представлены на геопортале “Речные бассейны Европейской России” [3].

Адекватность полученных оценок факторов эрозии проверяли как степень их согласия с результатами проводимых ранее исследований. Так, оценки К-фактора в целом хорошо согласуются с обобщенными для основных зональных типов почв ЕТР данными, приводимыми другими исследователями [8–11, 13, 14, 23]. Показатели С-фактора не противоречат обобщенным по ландшафтным зонам значениям С, которые получали ранее российские ученые [15, 23]. Сопоставление полученной оценки R-фактора с мелкомасштабной картой “Эрозионного потенциала осадков на территории

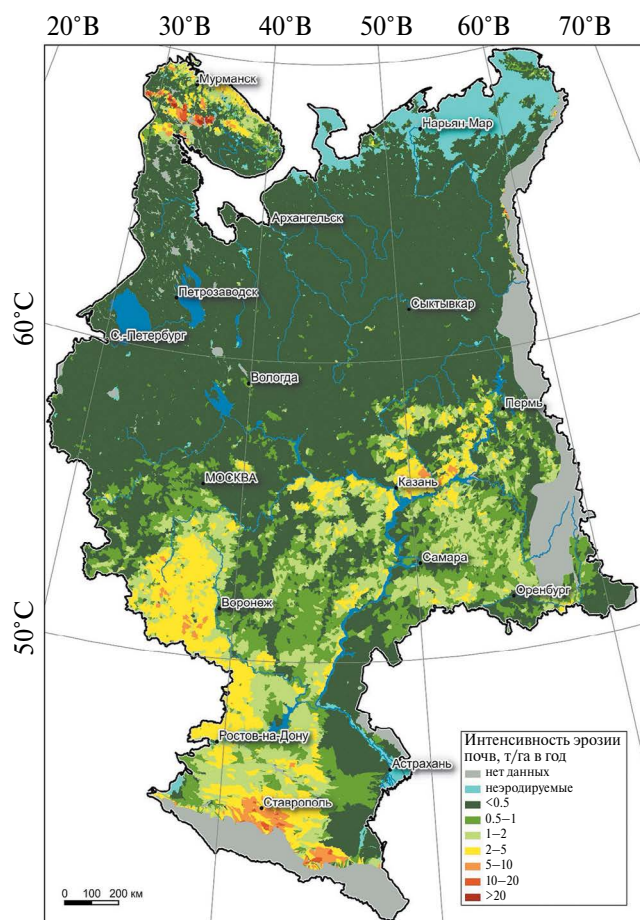


Рис. 4. Интенсивность эрозии почв от ливневого и талого стока (т/га в год, среднегодовое значение за период 2014–2019 гг.) в речных бассейнах.

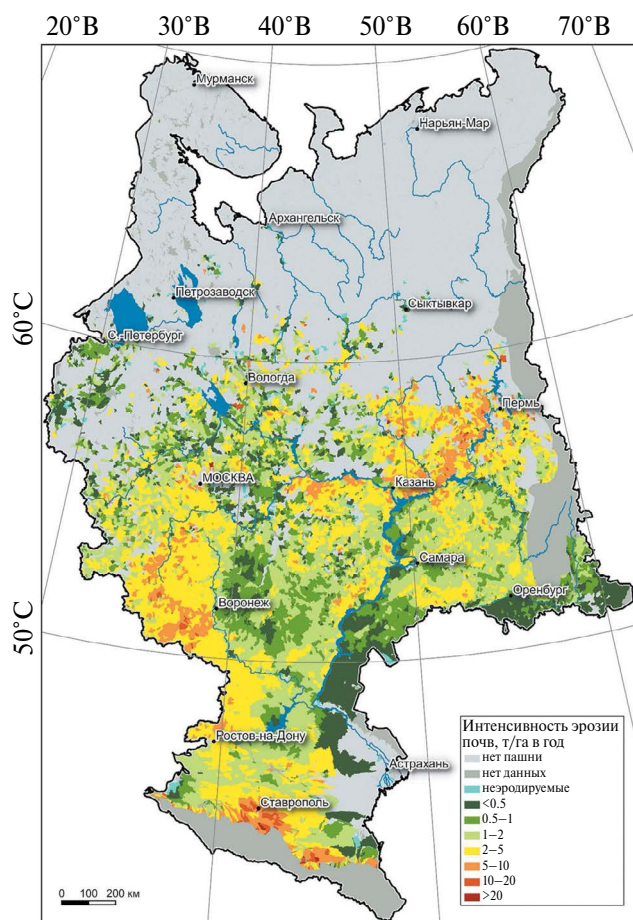


Рис. 5. Интенсивность эрозии почв от ливневого и талого стока (т/га в год, среднегодовое значение за период 2014–2019 гг.) с пахотных земель в речных бассейнах.

Таблица 4. Оценки факторов и интенсивности эрозии почв на пахотных землях ландшафтных зон ЕТР

Ландшафтная зона	R-фактор	K-фактор	LS-фактор	C-фактор	H_s	W_r	W_s	W
Северо- и средне-таежные	276	0.033	0.50	0.17	123	0.74	0.58	1.32
Южно-таежные	383	0.054	0.41	0.22	109	1.94	0.51	2.45
Смешанные и широколиственные	414	0.041	0.51	0.31	95	2.53	0.53	3.06
Лесостепные	405	0.026	0.44	0.38	89	1.79	0.21	2.00
Степные	501	0.029	0.36	0.45	58	2.03	0.10	2.13
Полупустынные и пустынные	297	0.036	0.11	0.45	49	0.63	0.03	0.66
Вся пашня ЕТР	455	0.031	0.41	0.40	74	2.10	0.22	2.32

Примечание. R-фактор – эрозионный потенциал осадков, (МДж мм)/(га ч) в год; K-фактор – эродируемость почвы, (т га ч)/(МДж га мм); LS-фактор – фактор рельефа, безразмерный. C-фактор – фактор растительности, безразмерный (от 0 до 1); H_s – максимальные предвесенние запасы воды в снеге, мм; W_r – интенсивность ливневого смыва, т/га в год; W_s – интенсивность талого смыва, т/га в год; W – интенсивность годового смыва, т/га в год.

Таблица 5. Оценки интенсивности эрозии почв на пахотных землях в субъектах РФ

Субъект РФ	W_r – интенсивность ливневого смыва, т/га в год	W_s – интенсивность талого смыва, т/га в год	W – интенсивность годового смыва, т/га в год*
Ненецкий А.О.			Нет пашни
			Очень слабая (0–0.5)
Астраханская обл.	0.35	0.01	0.35
			Слабая (0.5–1.0)
Псковская обл.	0.47	0.06	0.53
Новгородская обл.	0.57	0.06	0.64
Республика Коми	0.51	0.24	0.75
Ленинградская обл.	0.71	0.08	0.79
Республика Карелия	0.63	0.17	0.80
Тамбовская обл.	0.82	0.07	0.90
Мурманская обл.	0.77	0.21	0.98
			Умеренная (1–5)
Саратовская обл.	1.02	0.11	1.13
Тверская обл.	0.97	0.18	1.15
Архангельская обл.	0.71	0.49	1.20
Волгоградская обл.	1.13	0.08	1.21
Челябинская обл.	1.02	0.21	1.23
Оренбургская обл.	1.10	0.14	1.24
Костромская обл.	0.87	0.41	1.28
Пензенская обл.	1.19	0.15	1.34

Окончание табл. 5

Субъект РФ	W_r — интенсивность ливневого смыва, т/га в год	W_s — интенсивность талого смыва, т/га в год	W — интенсивность годового смыва, т/га в год*
Ярославская обл.	1.01	0.37	1.38
Самарская обл.	1.31	0.20	1.51
Ульяновская обл.	1.32	0.20	1.52
Республика Башкор- тостан	1.21	0.33	1.54
Рязанская обл.	1.36	0.19	1.56
Ивановская обл.	1.30	0.27	1.57
Республика Калмыкия	1.69	0.05	1.74
Вологодская обл.	1.11	0.63	1.74
Смоленская обл.	1.58	0.25	1.83
Воронежская обл.	1.71	0.18	1.89
Липецкая обл.	1.75	0.19	1.94
Калужская обл.	1.65	0.42	2.07
Республика Мордовия	1.81	0.31	2.11
Брянская обл.	2.02	0.16	2.18
Владимирская обл.	1.94	0.40	2.34
Чувашская Республика	1.93	0.51	2.44
Московская обл.	2.09	0.37	2.46
Свердловская обл.	1.71	0.76	2.47
Ростовская обл.	2.44	0.07	2.51
Республика Адыгея	2.71	0.02	2.73
Краснодарский край	2.91	0.05	2.96
Республика Татарстан	2.43	0.55	2.98
Нижегородская обл.	2.48	0.59	3.07
Кировская обл.	2.55	0.64	3.18
Республика Марий Эл	2.91	0.52	3.43
Тульская обл.	3.06	0.43	3.49
Ставропольский край	3.76	0.14	3.90
Курская обл.	3.72	0.31	4.04
Орловская обл.	3.67	0.37	4.05
Пермский край	2.94	1.17	4.11
Белгородская обл.	4.46	0.42	4.89
			Сильная (5–10)
Удмуртская Республика	4.37	1.00	5.38

* Типизация интенсивности эрозии проведена по ГОСТ 17.4.4.03-86.

России” [11] позволяет увидеть, несмотря на сильную генерализованность последней, в целом сходные закономерности пространственного распределения фактора R на ЕТР.

Несмотря на то, что пространственное распределение эрозии почв на пахотных землях носит очень изменчивый характер, можно отметить ряд характерных особенностей этого явления. Пространственный анализ интенсивности эрозии почв обсуждался на XXXVII пленарном межвузовском совещании по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов в г. Рязани [6]. Здесь можно лишь дать некоторые уточнения, поскольку рассматривается эрозия почв не только на пахотных землях.

Ничтожная почвенная эрозия наблюдается в двух полярно расположенных субъектах: Ненецком АО, где нет пахотных земель и на сухостепных и полупустынных землях Астраханской области. Слабая интенсивность эрозии почв характерна для субъектов, расположенных в таежно-лесной зоне.

Большинство субъектов РФ относятся к зоне умеренной интенсивности почвенной эрозии. Здесь можно выделить два основных макрорегиона. Один из них вытянут меридионально и расположен на западе в лесостепной и степной зонах. Здесь наибольшая интенсивность смыва доходит до 3–5 т/га в год, а вклад эрозии от талого стока составляет 0.3–0.4 т/га в год (Белгородская, Курская, Орловская области). Для другой группы субъектов РФ (Брянская, Ростовская области, Краснодарский край) характерна умеренная интенсивность эрозии в диапазоне 2.5–3.0 т/га в год с минимальным вкладом эрозии от талого смыва. Второй макрорегион простирается субширотно в пределах лесостепной и южной части лесной зоны. Здесь интенсивность эрозии почв увеличивается с 2 т/га в год (Калужская, Московская, Нижегородская области, Чувашия, Татарстан) до 3.5 т/га в год (Тульская, Кировская области, Пермский край, Марий-Эл), а вклад талого смыва увеличивается до 0.5 т/га в год, достигая абсолютного максимума в Пермском крае (1.17 т/га в год). В пределах лесостепных и степных ландшафтов восточной части Центрального федерального округа и западной части Приволжского федерального округа интенсивность эрозии почв снижается с 1.9 до 0.9 т/га в год (Воронежская, Липецкая, Рязанская, Тамбовская, Пензенская, Саратовская области).

В категорию сильной эрозии попадает только Удмуртская Республика за счет более высокой интенсивности талой эрозии, которая по своим значениям уступает лишь Пермскому краю.

Темпы эрозионных потерь почвы от ливневого и талого стока в речных бассейнах ЕТР почти на всех непахотных землях составляют менее 0.5 т/га в год.

Трудно разрешимой проблемой по целому ряду причин (метод определения, период наблюдений, масштаб и др.) остается верификация получаемых величин эрозии. Сопоставление с имеющимися данными, полученными по расчетам глобальной эрозии в модели Global Soil Erosion-2012 [30], для всей ЕТР показало, что полученные этой моделью величины эрозии примерно в два раза ниже, чем настоящие расчеты (среднее 0.31, медиана 0.033 т/га в год). На пахотных землях ЕТР в модели GloSEM1.3 [29] среднее значение эрозии (1.8 т/га в год) довольно близко к полученным данным, зато медианное меньше в 2.7 раза. Особенно контрастны величины эрозии в разных ландшафтных зонах. Так, в сельскохозяйственно освоенных ландшафтах южно-таежных, смешанных и широколиственных лесов, лесостепной и степной зон интенсивность эрозии почв в GloSEM1.3 в 2–3.5 раза меньше полученных значений. На существенное занижение величин эрозии этой моделью указывают данные [79], полученные по Белгородской области. В качестве основных причин этого можно отметить значительные различия в точности определения пахотных земель, С и К-факторов, а также ошибки в пространственном моделировании R-фактора. Сравнение с данными российских исследователей [4, 15, 23, 24] показало, что представленная в настоящей статье оценка современных темпов эрозии почвы на пахотных землях ЕТР в среднем в 1.5 раза ниже предшествующих. По данным [38], темпы смыва с пашни в ЕТР — 4.0 т/га в год, по нашей оценке — 2.4 т/га в год. Полученные ранее темпы эрозии для Татарстана по сходной методике [7] сопоставимы по талому смыву, но почти в два раза ниже по ливневому. Однако использовали старые (1960–1980 гг.) данные по R, обобщенные по С и генерализованные по площади пашни.

Такие отличия в оценках почвенной эрозии являются следствием применения разных методов и детальности определения факторов смыва. В этой связи полученные оценки по интенсивности эрозии почв в ЕТР, возможно, являются более реалистичными с учетом того, что они сделаны с детальным пространственным и временным разрешением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для макрорегиона России — равнинных ландшафтов ее европейской части — получены новые количественные оценки факторов и интенсивности эрозии почв с использованием бассейнового подхода и картографическим отображением результатов исследований. При этом основное внимание уделено получению современных и более точных оценок таких факторов, как эрозионный потенциал дождевых осадков (R-фактор), хозяйственно-агрономический (С-фактор) и предвесенние

запасы воды в снежном покрове. С использованием современных информационных технологий разработаны и реализованы новые методические подходы к оценке этих факторов эрозии. Новая методика оценки R-фактора позволяет использовать общедоступные данные многолетних срочных наблюдений за осадками на метеостанциях Росгидромета. Разработанная методика оценки C-фактора основана на анализе многовременных спутниковых данных о плотности растительности (F_{cover}), спектральных вегетационных индексов (NDVI и EVI MODIS) и фенологических метрик (VNP22Q2). В результате для территории ЕТР получены современные оценки C-фактора за период 2014–2019 гг. с высокой пространственной детальностью. Предложена методика оценки максимальных предвесенних запасов воды в снеге на базе обработки и анализа продукта Snow Water Equivalent, получаемого по спутниковым данным и содержащего ежедневные оценки количества воды в снежном покрове в зимние периоды. В результате выполнена среднесезонная оценка пространственного распределения максимальных предвесенних запасов воды в снеге на исследуемой территории.

Годовая интенсивность почвенной эрозии получена как сумма интенсивности смыва при ливневом и талом стоке. Оценка талого стока актуальна для ЕТР, где запасы воды в снежном покрове в ряде регионов могут вносить существенный вклад в процессы почвенной эрозии (Вологодская, Нижегородская, Кировская, Свердловская области, Татарстан, Марий Эл, Пермский край, Удмуртия, Чувашия).

Стоит отметить, что полученные результаты полностью охватывают всю территорию исследования без пропусков, где могут происходить процессы почвенной эрозии, включая пахотные земли, луговые сообщества и лесные участки. Высокий уровень пространственной детализации (размер ячеек раstra 250 м) позволил обеспечить региональный уровень исследования для ЕТР (масштаб 1 : 500 000). Результаты обобщены на уровне бассейнов малых рек. Речные бассейны обладают четкой иерархической структурой, что позволяет соблюдать принцип генерализации и сомасштабности при картографировании. Данные по факторам эрозии и ее интенсивности определены также для ландшафтных зон и в субъектах РФ. Проведена картографическая визуализация результатов исследований.

Сравнение полученных оценок интенсивности эрозионных потерь почв с пахотных земель ЕТР с данными предыдущих исследований [4, 15, 23, 24] показало, что полученные оценки в среднем в 1.5 раза ниже предшествующих. Темпы смыва с пашен в целом для ЕТР умеренные — 2.4 т/га. Различия в оценках эрозии связано с использованием различных операционно-территориальных единиц

анализа и подходов к оценке факторов эрозии. Полученные оценки, возможно, являются более реалистичными, так как сделаны с детальным для макрорегиона пространственным и временным разрешением. В то же время результаты оценок по интенсивности почвенной эрозии с точки зрения пространственно-временного анализа должны быть представлены в формате детального самостоятельного исследования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-17-00025).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Онлайн-версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу <https://doi.org/10.31857/S0032180X25020097>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашаткин И.А., Мальцев К.А., Гайнутдинова Г.Ф., Усманов Б.М., Гафуров А.М., Ганиева А.Ф., Мальцева Т.С., Гиззатуллина Э.Р. Анализ морфометрии рельефа по глобальным ЦМР в пределах южной части Европейской территории России // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2020. Т. 162. № 4. С. 612–628.
2. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
3. Геопортал “Речные бассейны Европейской России”: <http://bassepr.kpfu.ru/> (дата обращения: 15.03.2024).
4. Голосов В.Н., Ермолаев О.П. Пространственно-временные закономерности развития современных процессов природно-антропогенной эрозии на Русской равнине / Казань: Изд-во АН РТ. 2019. 372 с.
5. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России: <http://egrpr.esoil.ru/> (дата обращения: 12.03.2024).
6. Ермолаев О.П. Новая оценка интенсивности почвенной эрозии на Европейской территории России // Тридцать седьмое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме

- эрозионных, русловых и устьевых процессов (г. Рязань, 3–7 октября 2022 г.): Доклады и сообщения. М., 2022. С. 15–23.
7. Ермолаев О.П., Мальцев К.А. Оценка эрозионного риска для почвенного покрова лесных и лесостепных ландшафтов Среднего Поволжья средствами ГИС-технологий // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2008. Т. 150. № 4. С. 85–97.
 8. Кирюхина З.П., Пацукевич З.В. Смываемость пахотных почв // Работа водных потоков. 1987. С. 30–39.
 9. Кирюхина З.П., Пацукевич З.В. Эродированность пахотных почв России в период ливневого стока // Почвоведение. 2001. № 9. С. 1140–1146.
 10. Кирюхина З.П., Пацукевич З.В. Эродированность почв Европейской части Советского Союза // Вестник МГУ. 1989. № 1. С. 50–57.
 11. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки / Москва: Изд-во МГУ. 1993. 198 с.
 12. Лисецкий Ф.Н., Половинко В.В. Эрозионные катены на земляных фортификационных сооружениях // Геоморфология. 2012. № 2. С. 65–78.
 13. Лисецкий Ф.Н., Светличный А.А., Черный С.Г. Современные проблемы эрозиоведения. Белгород: Константа. 2012. 456 с.
 14. Литвин Л.Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: Академкнига, 2002. 256 с.
 15. 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.
 16. Мальцев К.А. Анализ качества глобальной цифровой модели рельефа GMTED2010 для оценки эрозионного потенциала (на примере юга Европейской территории России) // Изв. РГО. 2022. Т. 154. № 5–6. С. 112–122.
<https://doi.org/10.31857/S0869607122050068>
 17. Мальцев К.А., Ермолаев О.П. Потенциальные эрозионные потери почвы на пахотных землях Европейской части России // Почвоведение. 2019. № 12. С. 1502–1512.
 18. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Ч. 4. Влажность, осадки и снежный покров. Л.: Гидрометеиздат, 1990.
 19. Национальный атлас России. Т. 2. Природа. Экология / Гл. ред. Котляков В.М. М.: Роскартография, 2007. 495 с.
 20. Федеральная служба государственной статистики. База данных показателей муниципальных образований: <https://rosstat.gov.ru/dbscripts/munst/> (дата обращения: 13.03.2024).
 21. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды: <http://meteo.ru/> (дата обращения: 11.03.2024).
 22. Фридланд В.М. Почвенная карта РСФСР. М.: ГУГУК, 1988.
 23. Чалов С.Р. Речные наносы в эрозионно-русловых системах. Дис. ... д-р. геогр. наук. М., 2021. 358 с.
 24. Чалов С.Р., Сидорчук А.Ю., Голосов В.Н. Эрозионно-русловые системы. М.: ИНФРА-М., 2017. 698 с.
 25. Agriculture and Agri-Food Canada Annual Crop Inventory ground truth data. 2021.
 26. Angulo-Martínez M., Beguería S. Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain) // J. Hydrol. 2009. V. 379. № 1–2. P. 111–121.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.051>
 27. Bonilla C.A., Vidal K.L. Rainfall erosivity in Central Chile // J. Hydrol. 2011. V. 410. № 1–2. P. 126–133.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.022>
 28. Borrelli P., Alewell C., Alvarez P., Anache J.A.A., Baartman J., Ballabio C., Bezak N. et al. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis // Sci. Total Environ. 2021. V. 780. P. 146494.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>
 29. Borrelli P., Ballabio C., Yang J.E., Robinson D.A., Panagos P. GloSEM: High-resolution global estimates of present and future soil displacement in croplands by water erosion // Sci Data. 2022. V. 9. № 1. P. 406.
<https://doi.org/10.1038/s41597-022-01489-x>
 30. Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., Meusburger K. et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion // Nat Commun. 2017. V. 8. № 1. P. 2013.
<https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
 31. Capolongo D., Diodato N., Mannaerts C.M., Piccarreta M., Strobl R.O. Analyzing temporal changes in climate erosivity using a simplified rainfall erosivity model in Basilicata (southern Italy) // J. Hydrol. 2008. V. 356. № 1–2. P. 119–130.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.04.002>
 32. Copernicus Digital Elevation Model.
<https://doi.org/https://doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65>
 33. Danielson J.J., Gesch D.B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010) / Open-File Report 2011–1073. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. 2011.
 34. De Santos Loureiro N., De Azevedo Coutinho M. A new procedure to estimate the RUSLE EI30 index, based on monthly rainfall data and applied to the Algarve region, Portugal // J. Hydrol. 2001. V. 250. № 1–4. P. 12–18.
[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00387-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00387-0)
 35. Desmet P.J.J., Govers G.A. GIS-procedure for automatically calculating the USLE LS-factor on

- topographically complex landscape units // JSWC. 1966. V. 51. № 5. P. 427–433.
36. *Didan K.* MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061. 2021. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061>
 37. *Gafurov A., Mukharamova S., Saveliev A., Yermolaev O.* Advancing Agricultural Crop Recognition: The Application of LSTM Networks and Spatial Generalization in Satellite Data Analysis // *Agriculture*. 2023. V. 13. № 9. P. 1672. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091672>
 38. *Golosov V., Koiter A., Ivanov M., Maltsev K., Gusev 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. V. 18. № 12. P. 3388–3403. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2032-1>
 39. *Golosov V.N., Collins A.L., Dobrovolskaya N.G., Bazhenova O.I., Ryzhov Yu.V., Sidorchuk A.Y.* Soil loss on the arable lands of the forest-steppe and steppe zones of European Russia and Siberia during the period of intensive agriculture // *Geoderma*. 2021. V. 381. P. 114678. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114678>
 40. *Hastie T., Tibshirani R.* Generalized Additive Models // *Statist. Sci.* 1986. V. 1. № 3. <https://doi.org/10.1214/ss/1177013604>
 41. *Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J.* A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // *Environ. Res. Lett.* 2022. V. 17. № 2. P. 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
 42. *Hochreiter S., Schmidhuber J.* Long short-term memory // *Neural Computation*. 1997. V. 9. № 8. P. 1735–1780
 43. *Ivanov M.A., Mukharamova S.S., Yermolaev O.P., Es-suman-Quainoo B.* Mapping croplands with a long history of crop cultivation using time series of modis vegetation indices // *Uch. Zap. Kazan. Univ. Ser. Estestv. Nauki*. 2021. V. 162. № 2. P. 302–313. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.2.302-313>
 44. *Lee S., Wolberg G., Shin S.Y.* Scattered data interpolation with multilevel B-splines // *IEEE Trans. Visual. Comput. Graphics*. 1997. V. 3. № 3. P. 228–244. <https://doi.org/10.1109/2945.620490>
 45. *Liu Y., Zhao W., Liu Y., Pereira P.* Global rainfall erosivity changes between 1980 and 2017 based on an erosivity model using daily precipitation data // *Catena*. 2020. V. 194. P. 104768. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104768>
 46. *Maltsev K., Yermolaev O.* Assessment of soil loss by water erosion in small river basins in Russia // *Catena*. 2020. V. 195. P. 104726. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104726>
 47. *Melkonian A.K., Willis M.J., Pritchard M.E., Stewart A.J.* Recent changes in glacier velocities and thinning at Novaya Zemlya // *Remote Sens. Environ.* 2016. V. 174. P. 244–257. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.001>
 48. *Moore I.D., Nieber J.L.* Landscape Assessment of Soil Erosion and Nonpoint Source Pollution // *JMAS*. 1989. V. 55. № 1. P. 18–25.
 49. *Mukharamova S., Saveliev A., Ivanov M., Gafurov A., Yermolaev O.* Estimating the Soil Erosion Cover-Management Factor at the European Part of Russia // *IJGI*. 2021. V. 10. № 10. P. 645. <https://doi.org/10.3390/ijgi10100645>
 50. *Oliveira P.T.S., Rodrigues D.B.B., Sobrinho T.A., Carvalho D.F.D., Panachuki E.* Spatial variability of the rainfall erosive potential in the State of Mato Grosso do Sul, Brazil // *Eng. Agric.* 2012. V. 32. № 1. P. 69–79. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000100008>
 51. *Oliveira P.T.S., Wendland E., Nearing M.A.* Rainfall erosivity in Brazil: A review // *Catena*. 2013. V. 100. P. 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.08.006>
 52. *Panagos P., Ballabio C., Borrelli P., Meusburger K., Klik A., Rousseva S., Tadić M.P. et al.* Rainfall erosivity in Europe // *Sci. Total Environ.* 2015. V. 511. P. 801–814. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.008>
 53. *Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Yu B., Klik A., Jae Lim K., Yang J.E. et al.* Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. № 1. P. 4175. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>
 54. *Panagos P., Borrelli P., Spinoni J., Ballabio C., Meusburger K., Beguería S., Klik A. et al.* Monthly Rainfall Erosivity: Conversion Factors for Different Time Resolutions and Regional Assessments // *Water*. 2016. V. 8. № 4. P. 119. <https://doi.org/10.3390/w8040119>
 55. *Panagos P., Karydas C.G., Gitas I.Z., Montanarella L.* Monthly soil erosion monitoring based on remotely sensed biophysical parameters: a case study in Strymonas river basin towards a functional pan-European service // *Int. J. Digit. Earth*. 2012. V. 5. № 6. P. 461–487. <https://doi.org/10.1080/17538947.2011.587897>
 56. *Phinzi K., Ngetar N.S.* The assessment of water-borne erosion at catchment level using GIS-based RUSLE and remote sensing: A review // *Int. Soil Water Conserv. Res.* 2019. V. 7. P. 27–46. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.12.002>
 57. *Pulliainen J.* Mapping of snow water equivalent and snow depth in boreal and sub-arctic zones by assimilating space-borne microwave radiometer data and ground-based observations // *Remote Sens. Environ.* 2006. V. 101. № 2. P. 257–269. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.002>
 58. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, 2021.
 59. *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). U.S. Department of Agriculture, 1997. 403 p.
60. Renard K.G., Freimund J.R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE // J. Hydrol. 1994. V. 157. № 1–4. P. 287–306. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4)
 61. Renard K.G., Yoder D.C., Lightle D.T., Dabney S.M. Universal Soil Loss Equation and Revised Universal Soil Loss Equation // Handbook of Erosion Modeling / Eds. Morgan R.P.C., Nearing M.A. Wiley, 2010. P. 135–167. <https://doi.org/10.1002/9781444328455.ch8>
 62. Richardson C.W., Foster G.R., Wright D.A. Estimation of Erosion Index from Daily Rainfall Amount // Transactions of the ASAE. 1983. V. 26. № 1. P. 0153–0156. <https://doi.org/10.13031/2013.33893>
 63. Science documentation: Revised Universal Soil Loss Equation Version 2. USDA–ARS, Washington, DC. 2013.
 64. Tadono T., Nagai H., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., Iwamoto H. Generation of the 30 m-mesh global digital surface model by ALOS prism // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2016. V. XLI-B4. P. 157–162. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B4-157-2016>
 65. Takala M., Luojus K., Pulliainen J., Derksen C., Lemmetyinen J., Kärnä J.-P., Koskinen J. et al. Estimating northern hemisphere snow water equivalent for climate research through assimilation of space-borne radiometer data and ground-based measurements // Remote Sens. Environ. 2011. V. 115. № 12. P. 3517–3529. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.014>
 66. Van Rossum G., Drake F.L. Python 3 Reference Manual. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009.
 67. Wessel B., Huber M., Wohlfart C., Marschall U., Kosmann D., Roth A. Accuracy assessment of the global TanDEM-X Digital Elevation Model with GPS data // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2018. V. 139. P. 171–182. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.02.017>
 68. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington: US Gov. Print. Office, 1978. 537 p.
 69. Wolfs D., Verger A., Van der Goten R., Sánchez-Zapero J. Copernicus Global Land Operations “Vegetation and Energy” “CGLOPS-1” PRODUCT USER MANUAL Leaf Area Index (LAI) Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (FAPAR) Fraction of green Vegetation Cover (FCover) Collection 300m Version 1.1. 2022.
 70. Xie Y., Yin S., Liu B., Nearing M.A., Zhao Y. Models for estimating daily rainfall erosivity in China // J. Hydrol. 2016. V. 535. P. 547–558. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.020>
 71. Yamazaki D., Ikeshima D., Tawatari R., Yamaguchi T., O’Loughlin F., Neal J.C., Sampson C.C. et al. A high-accuracy map of global terrain elevations // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 44. № 11. P. 5844–5853. <https://doi.org/10.1002/2017GL072874>
 72. Yermolaev O.P. Geoinformation mapping of soil erosion in the Middle Volga region // Eurasian Soil Sci. 2017. V. 50. № 1. P. 118–131. <https://doi.org/10.1134/S1064229317010070>
 73. Yermolaev O.P., Mukharamova S.S., Maltsev K.A., Ivanov M.A., Ermolaeva P.O., Gayazov A.I., Mozzherin V.V. et al. Geographic Information System and Geoportal “River basins of the European Russia” // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2018. V. 107. P. 012108. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/107/1/012108>
 74. Yin S., Xie Y., Liu B., Nearing M.A. Rainfall erosivity estimation based on rainfall data collected over a range of temporal resolutions // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2015. V. 19. № 10. P. 4113–4126. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4113-2015>
 75. Yin S., Xie Y., Nearing M.A., Wang C. Estimation of rainfall erosivity using 5- to 60-minute fixed-interval rainfall data from China // Catena. 2007. V. 70. № 3. P. 306–312. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.10.011>
 76. Yu B. Rainfall erosivity and its estimation for Australia’s tropics // Soil Res. 1998. V. 36. № 1. P. 143. <https://doi.org/10.1071/S97025>
 77. Yu B., Hashim G.M., Eusof Z. Estimating the R-factor with limited rainfall data: A case study from Peninsular Malaysia // J. Soil Water Conserv. 2001. V. 56. № 2. P. 101–105.
 78. Zhang X., Friedl M., Henebry G. VIIRS/NPP Land Cover Dynamics Yearly L3 Global 500m SIN Grid V001. 2020. <https://doi.org/10.5067/VIIRS/VNP22Q2.001>
 79. Zhidkin A.P., Rukhovich D.I., Maltsev K.A. Variation of Soil Erosion Estimates Based on Different Maps of Cropland in Belgorod Oblast, Russia // Eurasian Soil Sci. 2024. V. 57. № 4. P. 666–676.

Soil Erosion Factors in the Macroregion of the European Part of Russia: Modeling, Geoinformation Mapping and Spatial Analysis

**O. P. Yermolaev^{a,*}, S. S. Mukharamova^a, K. A. Maltsev^a,
A. R. Polyakova^a, and A. A. Saveliev^a**

^aInstitute of Environmental Sciences, Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

**e-mail: zakieva.alika@mail.ru*

A new quantitative assessment of the factors of soil erosion and its intensity from storm and melt runoff was carried out in most of the European part of Russia for 2014–2019. Assessment is based on the universal soil loss equation USLE/RUSLE with spatial resolution 250 m. The results are generalized and cartographically presented in the geosystems of small river basins. A new approach has been developed for modeling the rainfall erosivity (R-factor) using intra-daily precipitation data. A rainfall erosivity model was developed using the GAM method and explained 87% of the data variability. A new methodology has been developed for detecting the cover management factor (C-factor) based on Earth remote sensing data. New results on the C-factor were obtained based on multi-temporal satellite data on vegetation density, spectral vegetation indices and phenological metrics. Snow Water Equivalent data from the Copernicus program was used as current data on water reserves in snow to determine the intensity of soil erosion from melt runoff. The annual intensity of soil erosion (from rain and melt runoff) throughout the entire territory is insignificant: on average 0.6 t/ha per year, median 0.02 t/ha per year. On the plowed lands of the basins, these values are higher: 2.4 t/ha per year and 1.6 t/ha per year, respectively.

Keywords: USLE/RUSLE, factor R, factor C, neural network, remote sensing, basin approach, soil erosion, rainfall runoff, melt runoff