

УДК 556.535.6

DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-3-125-138



ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВОДНОЙ ЭРОЗИИ ПОЧВ НА ТЕРРИТОРИИ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА

А. С. Цыпленков, Л. В. Кукулина*

МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1

* E-mail: ludmilakuksina@gmail.com

В работе на основе применения универсального уравнения эрозии почвы RUSLE оценивается пространственно-временная изменчивость водной эрозии почвы в Крыму для двух периодов 1958–1988 и 1989–2018 гг. Уровень эрозии почв на полуострове изменяется от слабо опасного до чрезвычайно опасного. Наиболее эродированные почвы приурочены к Южному берегу Крыма, что соответствует сочетанию наибольших значений эрозионной способности осадков и эрозионного потенциала рельефа. Установлено, что потери почвы в первый период несколько превышали аналогичную величину после 1989 г. (Σ на 13%), при этом доля земель, подверженных эрозии от средне опасной до чрезвычайно опасной, изменялась в пределах менее 1%. Указанные изменения могут быть связаны как с сокращением сельскохозяйственных обрабатываемых земель, так и с изменчивостью самих факторов смыва почв. Показано, что основную роль в формировании поверхностного смыва почвы на территории Крыма играют факторы эрозионной способности осадков, эрозионного потенциала рельефа, а также фактор растительности. На основе сопоставления величин фактического стока взвешенных наносов в замыкающих створах рек со значениями смыва почвы выявлена степень трансформации смытых частиц в сток наносов и показано, что для большинства рек, освещенных данными стационарного мониторинга за стоком взвешенных наносов, характерна аккумуляция продуктов эрозионного смыва, когда замыкающих створов достигает не более 50% смытого материала.

Ключевые слова: RUSLE, универсальное уравнение эрозии почвы, сток наносов, эрозионный потенциал осадков, эрозионный потенциал рельефа, эродируемость почвы, районирование.

Введение

Рост населения планеты, сельскохозяйственное освоение земель, сведение лесов наряду с климатическими изменениями, наблюдающимися с середины 1970-х годов, в том числе на территории Крыма, являются факторами, усиливающими негативное воздействие на окружающую среду, включая почвенный покров. С целью осуществления устойчивого развития землепользования необходима разработка инструментов и информационных сервисов, позволяющих выбирать наиболее эффективные варианты управления земельными ресурсами на основе выявления основных факторов, влияющих на эрозию почв, а также их наиболее негативных сочетаний.

Оценка таких параметров климатических изменений, как характеристики температуры воздуха и осадков, указывает на то, что они наблюдаются также и для регионального климата на территории Крыма [Нестеренко, 2016], в частности это подтверждается ростом количества дней с экстремальными осадками в юго-восточной части исследуемой территории [Voskresenskaya, Vyshkvarkova, 2016].

Регион характеризуется значительной степенью хозяйственного освоения, что в совокупности с особенностями рельефа территории, деградацией растительного покрова приводит к интенсификации процессов эрозии. Согласно последним исследованиям [Ergina et al., 2020], порядка 70% сельскохозяйственных угодий на территории Крыма подвержено воздействию различных видов эрозии, из них более 10% — влиянию водной эрозии. Кроме того, причиной значительных изменений землепользования на территории Крымского региона должен был послужить распад СССР в 1991 г., когда произошел переход земель из-под государственного управления и использования крупными хозяйствами в частные права собственности [Hartvigsen, 2014]. В целом реструктуризация экономики привела к запустению многих сельскохозяйственных угодий на территории бывшего СССР. Согласно предыдущим исследованиям [Levis et al., 2018], площадь пахотных земель за период 1990–2010 гг. сократилась на 10% с 18700 до 15700 км². Наиболее существенные изменения затронули северную часть Крыма (сокращение до 23%) и Керченский полуостров (16%).

Исследования различных процессов денудации [Клюкин, 2005, 2007], наблюдающихся на территории Крыма в последние десятилетия, показывают, что происходит их значительное усиление вплоть до экстремальных значений. Согласно данным [Региональная программа..., 1995; Сташкина, 2012], наблюдается усиление потерь почвы за счет поверхностного смыва, а водная эрозия почвы является одним из преобладающих процессов, способствующих ухудшению почвенного покрова сельскохозяйственных угодий на территории Крыма [Ergina et al., 2020].

С учетом сокращения сельскохозяйственных земель и наблюдающихся климатических изменений [Куксина и др., 2021] можно предположить изменение пространственно-временной структуры потерь почвы за счет поверхностного смыва и, соответственно, перераспределения стока взвешенных наносов. Кроме того, предлагаемое исследование предполагает более крупномасштабные оценки эрозии почвы по сравнению с ранее выполнявшимися расчетами, характеризующимися малым масштабом [Ларионов, 1993; Borrelli et al., 2022].

Основной целью предлагаемого исследования является оценка пространственно-временной изменчивости водной эрозии почв на территории Крыма для двух периодов на основе универсального уравнения эрозии почвы (RUSLE) с использованием наилучших доступных баз данных для изучаемого региона, а также с привлечением доступных открытых данных стационарного мониторинга на гидрологических и метеорологических постах и станциях в исследуемом регионе.

Материалы и методы

Оценка эрозии почвы. Потери почвы в результате плоскостного смыва и ручейковой эрозии оценивались на основе пространственно-распределенной модифицированной версии универсального уравнения эрозии почвы RUSLE [Renard et al., 1997]. RUSLE учитывает комплекс факторов, влияющих на величину поверхностного смыва:

$$Y = R \times K \times C \times LS \times P, \tag{1}$$

где Y — смыв почвы с единицы площади в $t \cdot га^{-1}$; R — фактор осадков, представляющий собой среднееголетнее значение эрозионного потенциала осадков, характеризующего эрозионную способность дождей, $МДж \cdot мм \cdot ч^{-1} \cdot га^{-1} \cdot год^{-1}$; K — фактор эродированности (смываемости) почвы, численно равный модулю смыва с площадки длиной 22,1 м и уклоном 9%, содержащейся по бессменному пару и отнесенный к величине эрозионного потенциала осадков, $т \cdot час \cdot МДж^{-1} \cdot мм^{-1}$; L — фактор длины склонов, представляющий собой отношение смыва со склона некоторой длины к смыву со склона длиной 22,1 м при прочих равных условиях, безразмерный; S — фактор уклона, представляющий собой отношение смыва со склона некоторой крутизны к смыву со склона уклоном 9% при прочих равных условиях, безразмерный; C — индекс, отражающий влияние землепользования, который зависит от растительного покрова, безразмерный; P — фактор эффективности противоэрозионных мер, представляющий собой отношение смыва с поля, на котором применяются противоэрозионные меры, к смыву с поля, на котором противоэрозионные меры не при-

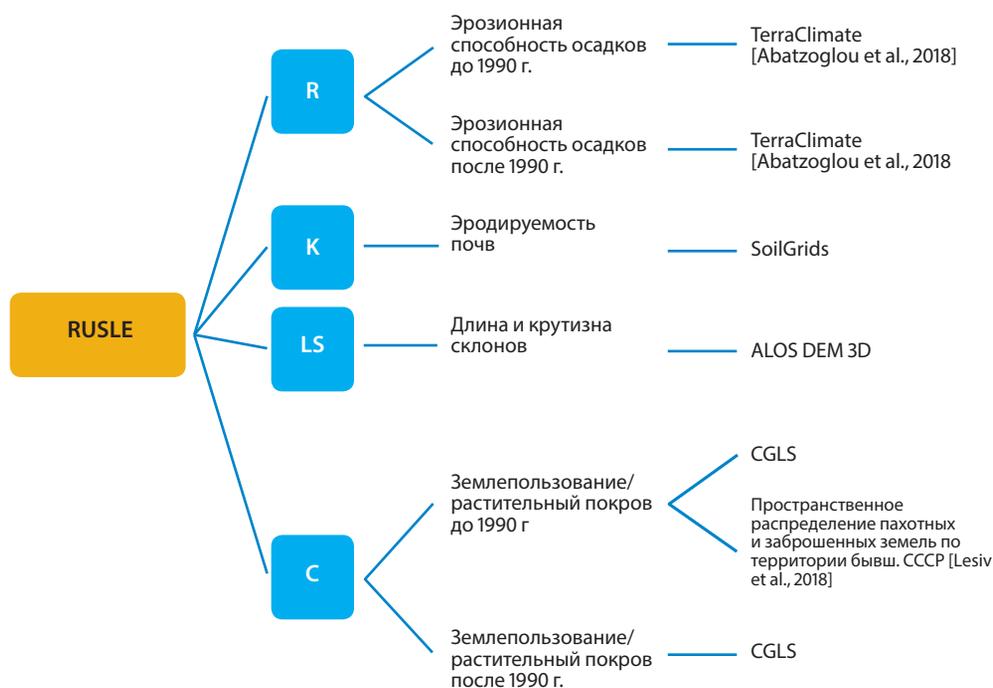


Рис. 1. Схематическое описание методологической основы, использованной для оценки эрозии почвы

меняются, а обработка почвы и посев ведутся вдоль склона, безразмерный.

В настоящее время предлагаемая модель является наиболее широко используемой для оценок поверхностного смыва почвы в различных пространственно-временных масштабах [Лисецкий и др., 2012].

Основное различие между данным исследованием и предшествующими результатами, полученными в ходе глобального применения модели эрозии RUSLE [Tamene, Le, 2015; Borrelli et al., 2017, 2022; Haregeweyn et al., 2017], заключается в том, что в настоящей работе используются значительно более качественные входные данные. Мы применили методику, предложенную в работе [Fenta et al., 2020], с минимальными изменениями и доработками. Рис. 1 иллюстрирует методологическую базу, использовавшуюся для оценки водной эрозии.

Факторы формирования поверхностного смыва почвы

Осадки. Эрозионная способность осадков (R -фактор, $\text{МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$) представляет собой многолетний средний индекс, применяемый для измерения кинетической энергии и интенсивности дождевых осадков с целью оценки воздействия дождя на плоскостную и ручейковую эрозию

[Wischmeier, Smith, 1978]. Для оценки этого фактора в оригинальном методе (см. уравнение 1) необходима информация о максимальной 30-мин интенсивности дождя (I_{30}).

Сведения об осадках на территории Крымского полуострова, доступные в открытых источниках, имеются для 24 метеорологических станций за период с 1960 г. по настоящее время [Куксина и др., 2021]. Однако на всей территории бывшего СССР, в том числе в Крыму, количество метеорологических станций с измерениями интенсивности дождевых осадков и их кинетической энергии за короткие временные промежутки очень ограничено, в результате чего пространственная интерполяция точечных данных дает не очень качественные результаты. Для таких регионов с ограниченным набором необходимых данных оправдывает себя подход, основанный на интегрировании точечных данных, полученных в ходе измерений на метеорологических постах и станциях, с данными об осадках, получаемых со спутниковых снимков [Haregeweyn et al., 2017; Vrieling et al., 2010], что позволяет выполнять картирование эрозионной способности осадков.

В предлагаемом исследовании используется карта R -фактора, созданная на основе установленной взаимосвязи многолетних значений R -фактора, оцененных по данным стационарных метеороло-

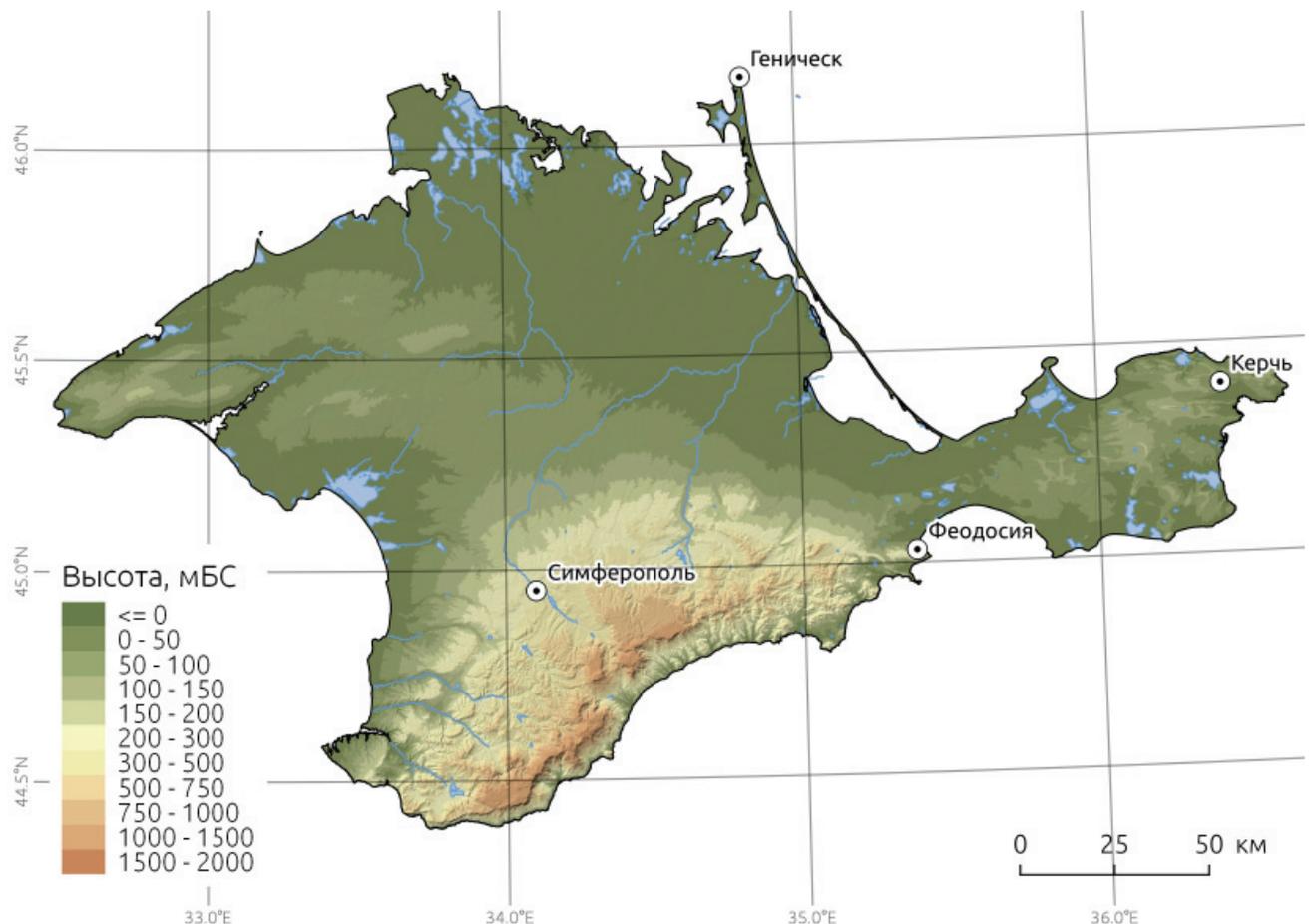


Рис. 2. Карта рельефа п-ова Крым по данным ГЦМР Alos World 3D

гических станций в Крыму, и величин эрозионной способности осадков, полученных с использованием спутниковых данных TerraClimate [Abatzoglou et al., 2018], комбинирующих сведения о дождях из нескольких источников. Данные о величинах эрозионной способности осадков (средние значения *R*-фактора в 1961–1983 гг.) в различных климатических зонах Крымского полуострова подготовлены на основе опубликованных сведений для пяти станций с часовыми измерениями [Ларионов, 1993]. Эти сведения использовались для оценки ЭПО в 1958–1988 гг. по взаимосвязи значений ЭПО с суммами осадков для метеостанций на территории Крыма. Для последующего периода 1989–2018 гг. привлекались сведения более современных баз данных с применением спутниковых данных [Abatzoglou et al., 2018].

Рельеф. Сведения о рельефе необходимы для расчета фактора *LS* (см. уравнение (1)). В данном исследовании использовалась глобальная цифровая модель рельефа (ГЦМР) ALOS World 3D (AW3D30) Version 2.2 (<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>) с пространственным разрешением 1×1 сек, что эквивалентно 23×23 м (рис. 2). ЦМР данного разрешения считается достаточной для моделирования эрозии почв [Wu et al., 2005]. Была произведена ее гидрологическая коррекция при помощи алгоритма *Fill Sinks* [Wang, Liu, 2006], реализованного в QGIS 3.6.2, минимальный уклон, при котором возможен сток, был оставлен по умолчанию равным 0,01°.

Расчет эрозионного потенциала рельефа (фактор *LS* из уравнения (1)) производился в QGIS 3.6.2 с использованием модуля *LS field-based* из SAGA GIS [Conrad et al., 2015] в соответствии с рекомендациями [Panagos et al., 2015]. Данный алгоритм основан на уравнении, предложенном [Desmet, Govers, 1996]:

$$LS = (m + 1) \left(\frac{U}{L_0}\right)^m \left(\frac{\sin\beta}{S_0}\right)^n, \quad (2)$$

где *LS* — фактор длины и крутизны склона из уравнения (1), безразмерный; *U* — вышележащая водосборная площадь, отнесенная к ширине потока, м²×м⁻¹; *L*₀, *S*₀ — длина и крутизна стандартной стоковой площадки Уишмейера–Смита [Wischmeier et al., 1958] (22,1 м и 0,09°); β — крутизна склона, °; *m* (0,4–0,6) и *n* (1,0–1,3) — эмпирические параметры, зависящие от преобладающего типа эрозии (плоскостной или речевой).

Максимальный уклон, для которого определяется фактор *LS*, составляет 26,6° [Griffin et al., 1988; Wilson, 1986]. Однако доля такой территории очень мала (0,18 км², или 0,01% территории) и в основном связана с ошибками (артефактами) в ГЦМР. Данные области были исключены в дальнейшем из расчета, так как потенциально могут привести к завышению общего смыва почв. Основной недостаток данного метода состоит в том, что он не учитывает антропогенные линейные объекты, которые обычно не отображены на ГЦМР, однако приводят к прерыванию линий тока [Panagos et al., 2015].

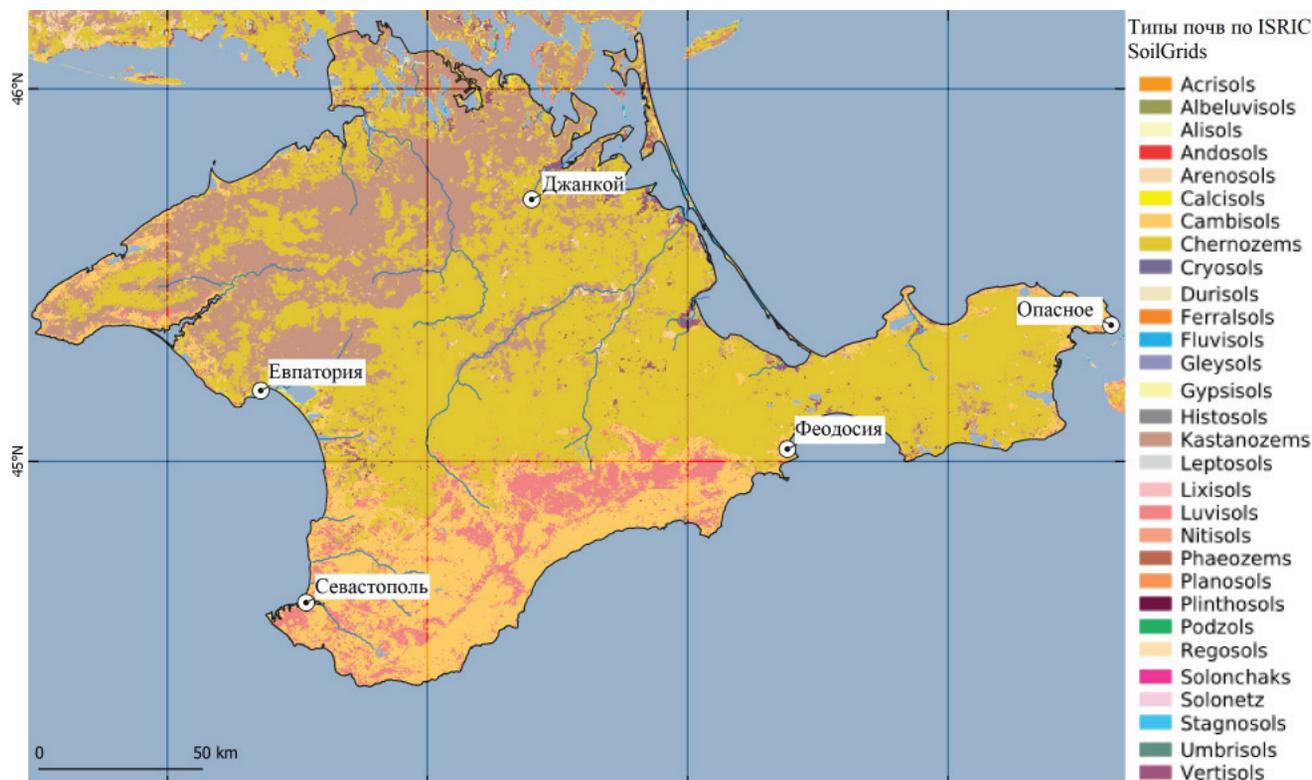


Рис. 3. Типы почв на территории Крыма по [Hengl et al., 2017]

Почвы. На территории Крымского полуострова наиболее распространенными почвами являются черноземы. Они занимают около 70% площади пахотных земель в регионе и характеризуются средней эродированностью [Литвин, 2002]. Близки по степени подверженности эрозии каштановые почвы, наиболее распространенные на севере Крыма и Керченском полуострове, на их долю приходится около четверти пахотных угодий. На долю луговых солонцовых, дерново-карбонатных, горных буроземов и коричневых почв в совокупности приходится порядка 5%.

Подготовка карты эродированности почв (фактор K из уравнения (1)) основывалась на данных о таких свойствах верхнего слоя почвы (0–30 см), как гранулометрический состав, содержание органического вещества, структура и проницаемость, полученных из базы данных SoilGrids [Hengl et al., 2017] Международного справочно-информационного центра по почвам (ISRIC), имеющей разрешение 250 м (рис. 3).

Оценка эродированности почв K проводилась на основе уравнения, предложенного в работе [Benavidez et al., 2018]:

$$K = 0,1317 \times \left[0,2 + 0,3 \times \exp \left(0,0256 \times Sa \times \left(1 - \frac{Si}{100} \right) \right) \times \left(\frac{Si}{Cl + Si} \right)^{0,3} \times \left(1 - \frac{0,25C}{C + \exp(3,72 - 2,95C)} \right) \times \left(1 - \frac{0,7Sn}{Sn + \exp(-5,51 + 22,9 * Sn)} \right) \right], \quad (3)$$

где Sa — содержание песчаных частиц, %; Si — содержание илистых частиц, %; Cl — содержание глинистых частиц, %; Sn — параметр размера частиц $(1 - Sa/100)$; C — содержание органического вещества, %.

Растительность. Оценка фактора растительности (C -фактор) основывалась на карте земного покрова CGLS, полученной на основе данных PROBA-V разрешением 100 м за 2019 базисный год. CGLS карта земного покрова дает информацию о 18 классах покрова и оценки растительности для 4 типов: лес, травянистая растительность, кустарники и отсутствие/редкая растительность. Валидация данных карты CGLS на независимом материале показывает, что CGLS имеет хорошее качество, точность составляет 75% [Tsendbazar et al., 2018].

В данном исследовании C -фактор оценивался отдельно для возделываемых и не возделываемых земель согласно подходу, примененному в работе [Fenta et al., 2020]. На основе комбинирования полученных карт была подготовлена карта C -фактора для территории Крыма разрешением 100 м.

Для оценки пространственного распределения различных классов землепользования/земного покрова в конце XX века мы допустили предположение, что в период существования СССР площадь пахотных земель оставалась относительно ста-

бильной, что отражает ситуация на 1990 г. В связи с этим для оценки пространственного распределения пахотных земель в 1958–1988 гг. мы использовали набор данных, подготовленный в работе [Lesiv et al., 2018].

Величина фактора растительности на пахотных землях (пашня и многолетние культуры) зависит от типа сельскохозяйственных культур. Данные Agro-MAPS с пространственной сеткой 10×10 км (<http://mapspam.info/data/>) использовались с целью оценки урожайных площадей для основных типов сельскохозяйственных культур в 2005–2010 гг. Величина севооборота имеет важное значение, но в общем доля посевов для такого крупного масштаба (10×10 км) считается стабильной [Monfreda et al., 2008; Panagos et al., 2015; Borrelli et al., 2017]. Каждому основному типу сельскохозяйственных культур было присвоено значение C -фактора согласно литературным источникам (табл. 1). C -фактор для пахотных земель (C_{crop}) рассчитывается как

Таблица 1

Основные типы урожайных культур и занимаемые ими площади в 2010 г. Величина C -фактора присвоена согласно [Borrelli et al., 2015]

С/х культура	Площадь, га	C
Пшеница	290000	0,2
Ячмень	191000	0,2
Кукуруза	121000	0,38
Другие масличные	57600	0,25
Другие зерновые	45700	0,2
Подсолнечник	41100	0,25
Рапс	33500	0,25
Соя	30500	0,32
Картофель	27000	0,34
Овощи	24500	0,25
Фрукты умеренных широт	16700	0,15
Другие бобовые	14900	0,32
Просо	5620	0,2
Тропические фрукты	5400	0,15
Рис	4070	0,15
Сорго	1270	0,2
Бобы	983	0,32
Остальные культуры	732	0,2
Другие волокнистые культуры	127	0,28
Сахарная свекла	51	0,34
Табак	6	0,5
Чечевица	2	0,32

$$C_{crop} = \sum_{i=1}^n C_{crop_i} \times [\%]GRID_{crop_i}, \quad (4)$$

где C_{crop_i} соответствует величине С-фактора культуры i и $[\%]GRID_{crop_i}$ отражает долю этой пахотной культуры в общей площади пахотных земель внутри ячейки 10×10 км. C_{crop} представляет собой средневзвешенное значение С-фактора для основных типов сельскохозяйственных культур внутри каждой ячейки 10×10 км.

Гидрологические данные. Эрозия почвы является важнейшей составляющей стока наносов на водосборе [Алексеевский, 1998]. Соотношение фактического стока наносов в замыкающих створах рек и величины потенциального смыва частиц почвы на водосборе позволяет охарактеризовать перемещение материала в пределах речного бассейна.

Для пространственно-временной оценки эрозии почвы на территории Крымского полуострова в качестве расчетных периодов были выбраны 1958–1988 и 1989–2018 гг. (условно до и после распада СССР). Выбор 1988 г. в качестве граничного объясняется необходимостью верификации результатов модельных расчетов на независимых данных, в качестве которых нами были использованы данные стационарных гидрологических постов УГМС по наблюдению за характеристиками стока взвешенных наносов, находившиеся в открытом доступе вплоть до 1988 г. Выполненный нами гидрологический анализ основан на данных стационарных наблюдений за расходами взвешенных наносов (R , кг·сек⁻¹) на 15 постах УГМС в Крыму. База данных содержит информацию из открытых источников и охватывает период с 1950 по 1988 гг.

Распределение стока взвешенных наносов в реках Крыма во многом зависит от расходов воды и соответствует сезонной изменчивости, характерной для рек Черноморского побережья (рис. 4). Для

рек региона характерен паводочный режим стока, когда большая часть паводков проходит в зимний период, а летом и в летне-осеннее время наблюдается крайне низкая межень [Михайлов, Добролюбов, 2017], иногда прерываемая очень мощными внезапными ливневыми паводками [Куксина и др., 2021; Куксина и др., 2023]. В этих случаях пиковые мгновенные расходы взвешенных наносов могут превышать среднегодовые значения в 200–400 раз [Куксина и др., 2021].

Значения среднегодовых расходов взвешенных наносов применялись для оценки годового стока взвешенных наносов (т·год⁻¹), необходимого в дальнейшем для валидации полученных нами результатов модельных оценок эрозии почвы на территории Крыма.

Районирование. Для выделения областей или регионов со схожими условиями формирования эрозии почвы был применен метод неконтролируемой иерархической кластеризации k -средних. Цель кластерного анализа заключалась в том, чтобы установить, попадает ли подбассейн в отдельную группу. На территории Крыма было выделено 527 подбассейнов с площадью водосбора от 25 до 65 км², характеризующихся определенной совокупностью факторов поверхностного смыва почвы. Для каждого из выделенных подбассейнов была выполнена зональная оценка эрозии почвы и морфометрических характеристик. Таким образом, набор данных содержал сведения о величине среднегодовых потерь почвы в каждом подбассейне (т·год⁻¹), коэффициенте вариации среднегодовых потерь почвы (т·га⁻¹·год⁻¹) внутри подбассейна, средней высоте (м) и диапазоне высот в пределах подбассейна (м). На основе подготовленного массива данных в дальнейшем было выделено пять классов эродлируемых

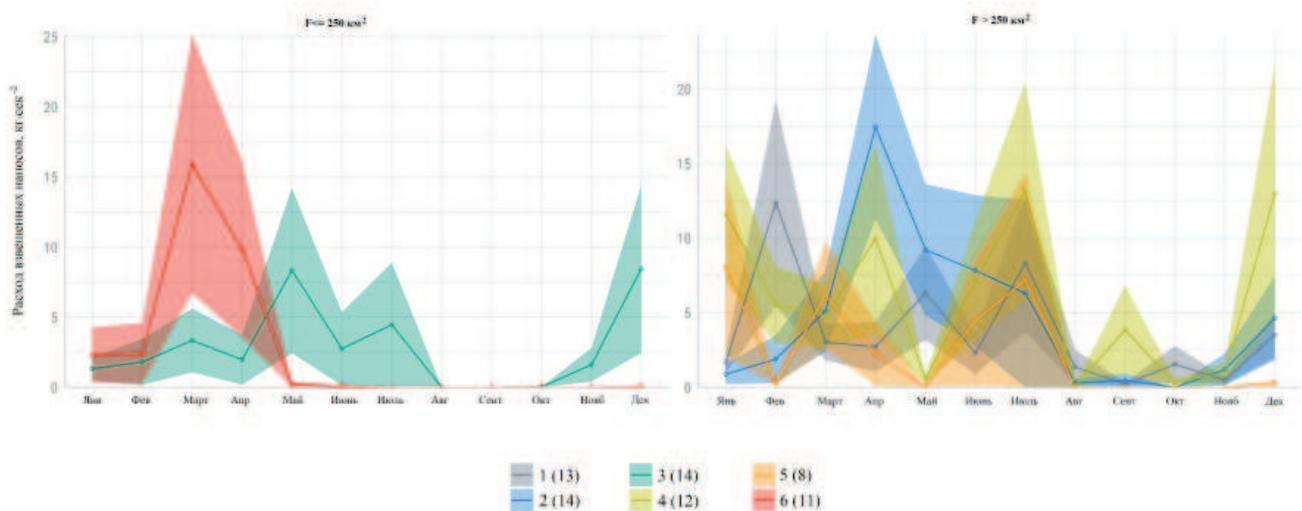


Рис. 4. Среднемесечные значения расходов взвешенных наносов на стационарных постах на реках Крыма. Цветом показаны диапазоны стандартных ошибок, рассчитанные для всего периода наблюдений (продолжительность периода указана в скобках).

- 1 — Бельбек—Куйбышево, 2 — Чёрная—Чернореченская, 3 — Дерекойка—Ялта,
- 4 — Кача—Комсомольское, 5 — Салгир—Пионерское, Су—Индол—Тополевка

Суммарная статистика по расчетным значениям факторов *RUSLE*

	R [МДж·мм·га ⁻¹ ·ч ⁻¹ ·год ⁻¹]		C [-]		K [т·га·ч·МДж ⁻¹ ·мм ⁻¹]	LS [-]
	1958–1988	1989–2018	1958–1988	1989–2018		
Min.	115	183	0	0	0,05	0,03
1st Qu.	451	511	0,01	0,01	0,06	0,1
Median	582	613	0,01	0,01	0,06	0,32
Mean	650	721	0,04	0,03	0,06	0,96
3rd Qu.	712	808	0,08	0,07	0,06	0,72
Max.	2522	2688	0,13	0,13	0,08	25,2

земель на территории Крымского полуострова по комбинации этих параметров.

Результаты

Факторы эрозии почвы. Проведенные расчеты позволили оценить факторы поверхностного смыва почв (табл. 2) с поверхности водосборов в результате воздействия водных потоков (плоскостного смыва и ручейковой эрозии). Два из них (*R*, *C*) оценивались для различных временных отрезков (1959–1988 и 1989–2018 гг.), другие считались относительно неизменными для рассматриваемого пространственно-временного масштаба.

Карты распределения факторов смыва почв.

На основе данных с применением описанных выше методов были получены карты распределения факторов формирования поверхностного смыва почвы на территории Крымского полуострова: для периодов 1959–1988 и 1989–2018 гг. — карты распределения эрозионной способности осадков *R* (рис. 5) и эрозионного потенциала рельефа *LS* (рис. 6), для всего периода — эродированности почв *K* (рис. 7), фактора растительного покрова *C* (рис. 8).

Скорость эрозии почвы. Оценка среднегодовых потерь почвы за счет поверхностного смыва

выполнена для двух периодов 1959–1988 и 1989–2018 гг. и представлена на рис. 9, где степень эродированности земель описывается пятью классами (табл. 3) от неопасной (менее 0,5 т·га⁻¹·год⁻¹) до чрезвычайно опасной (более 10 т·га⁻¹·год⁻¹). Районы, характеризующиеся наибольшей степенью эродированности почв, относятся к Южному берегу Крыма (ЮБК) (см. рис. 9), что определяется сочетанием высоких значений коэффициентов эрозионной способности осадков (*R*-фактор, см. рис. 5) и относительно крутых склонов поверхности (*LS*-фактор, см. рис. 6).

Обсуждение

Пространственно-временная изменчивость эрозии почвы в Крыму. Анализ временной изменчивости динамических факторов поверхностного смыва почвы в Крыму (эрозионный потенциал осадков и растительность) для двух расчетных периодов показывает, что произошло снижение фактора растительного покрова (на 25%), что может быть связано с изменением характера землепользования в регионе. Одновременно с этим наблюдается рост эрозионной способности осадков (Σ на 10%), что, вероятно, объясняется ростом экстре-

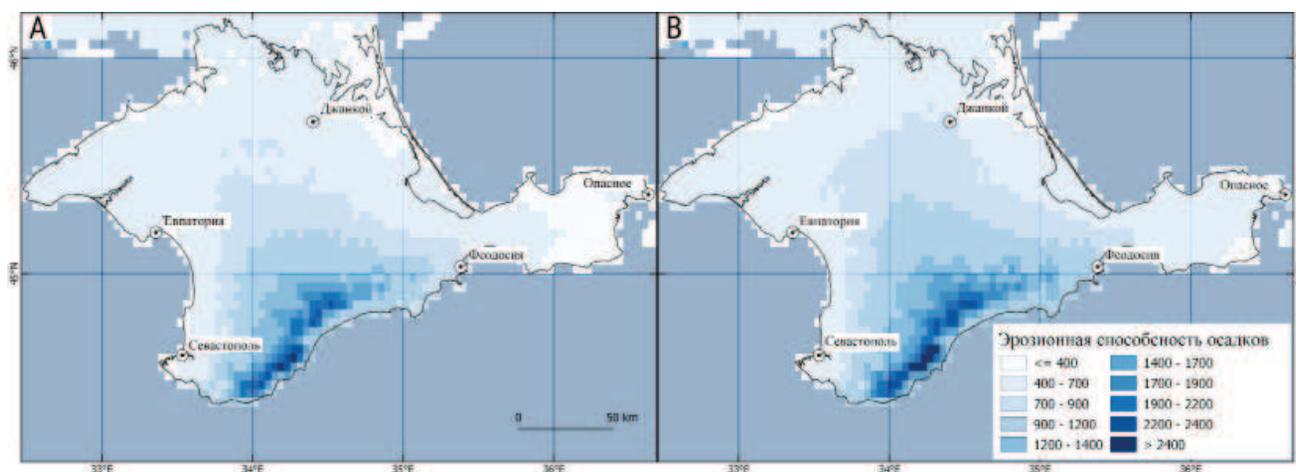


Рис. 5. Среднеголетняя эрозионная способность осадков *R* (МДж·мм·га⁻¹·ч⁻¹ год⁻¹) для периодов 1958–1988 (А) и 1989–2018 гг. (В)

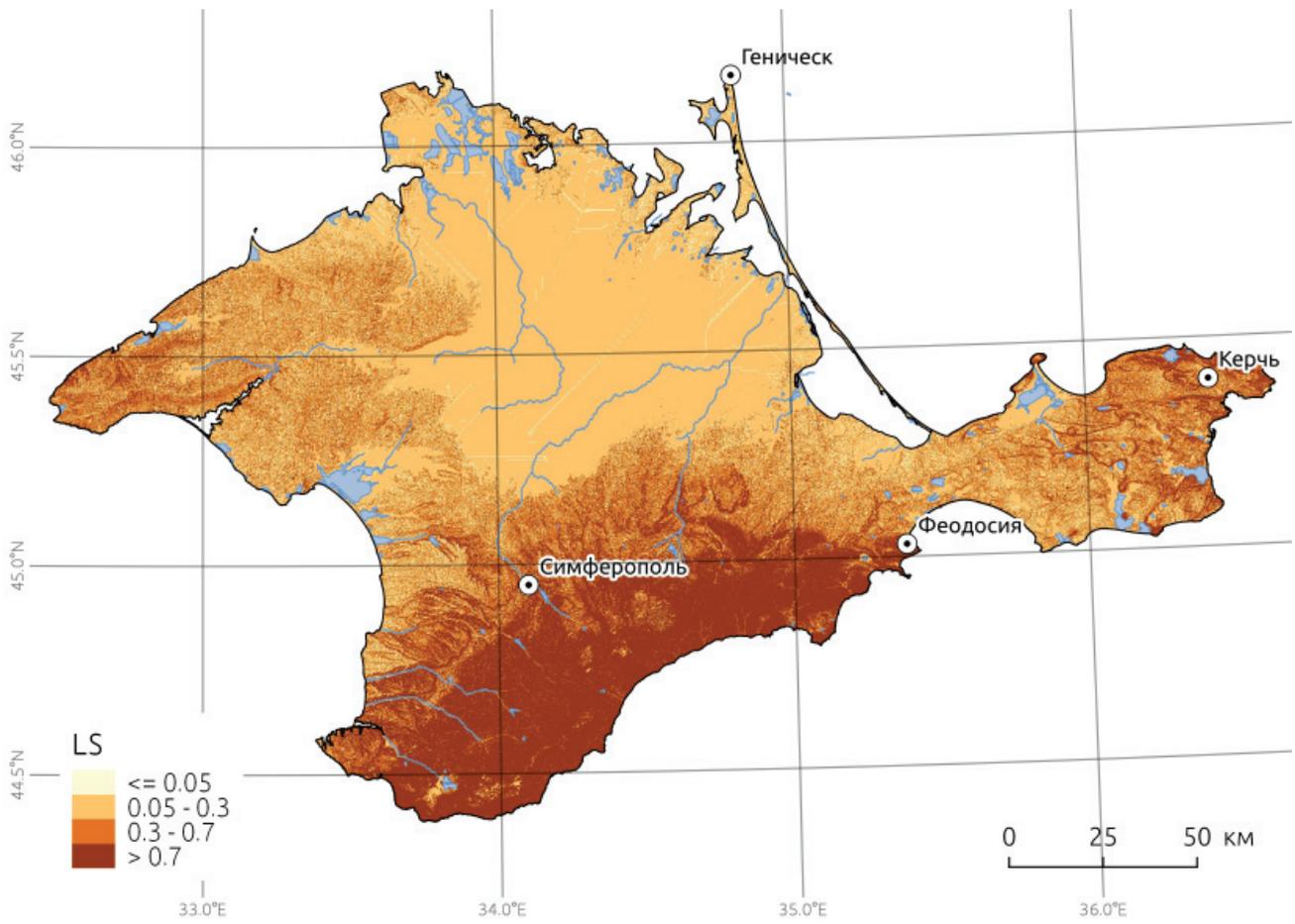


Рис. 6. Распределение фактора LS по территории п-ова Крым

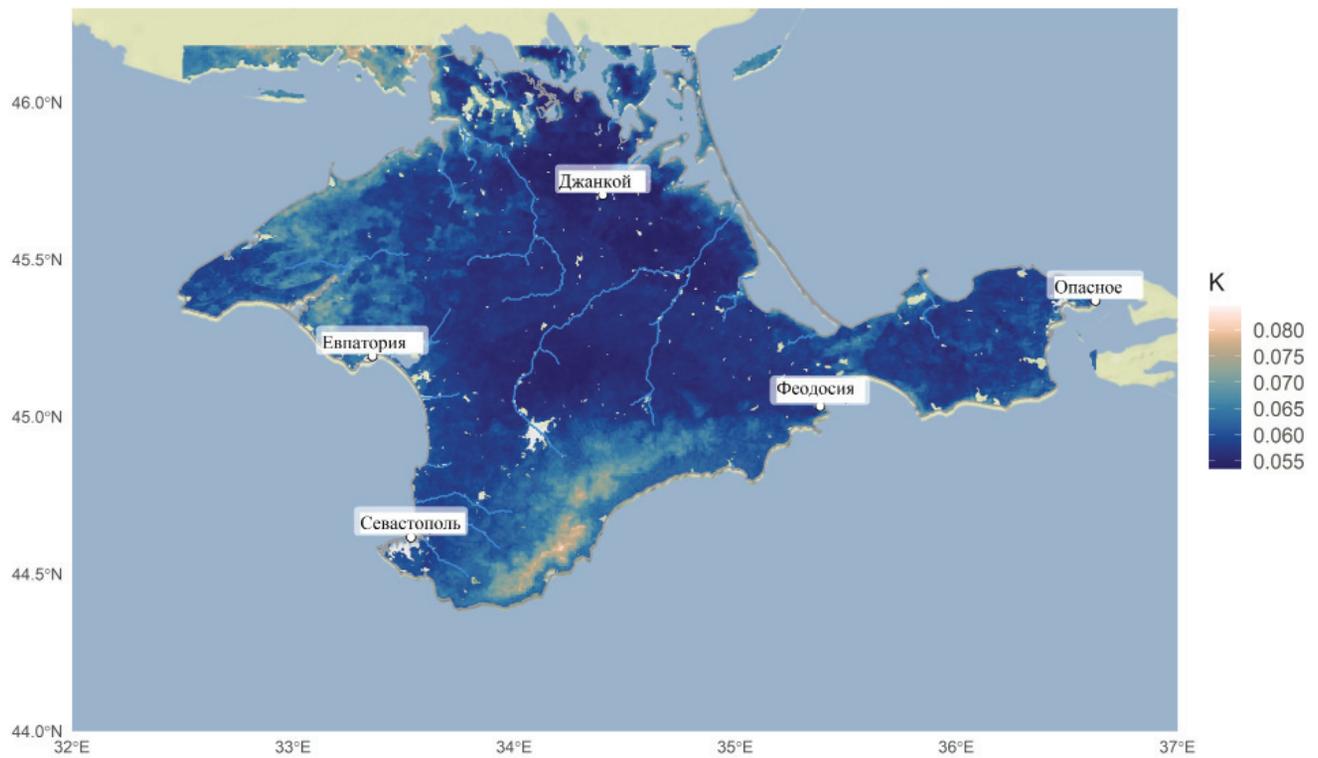


Рис. 7. Эродлируемость почв Крыма K , $\text{т}\cdot\text{га}\cdot\text{час}\cdot\text{МДж}^{-1}\cdot\text{мм}^{-1}$

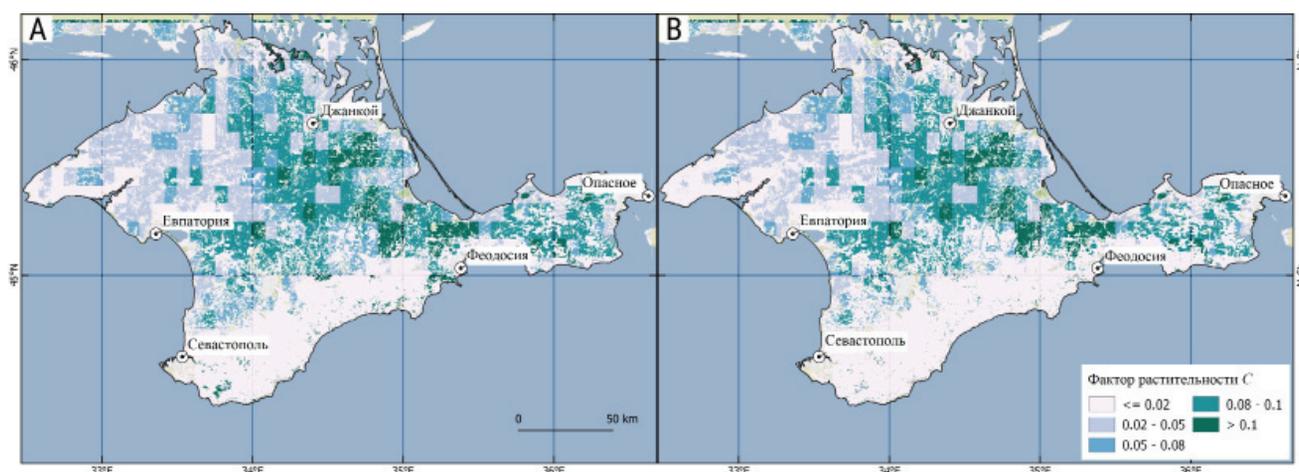


Рис. 8. Распределение фактора С в Крыму для периодов 1958–1988 (А) и 1989–2018 гг. (В)

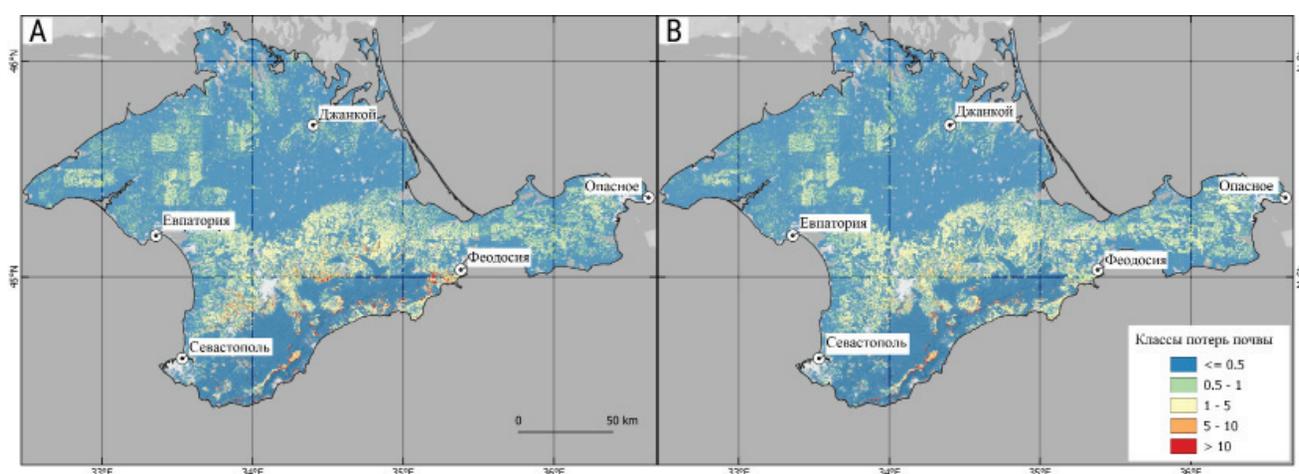


Рис. 9. Пространственное распределение скоростей эрозии почвы и соответствующие им классы потерь в 1958–1988 (А) и 1989–2018 гг. (В) на территории Крыма, $t \cdot га^{-1} \cdot год^{-1}$

Таблица 3

Классы эрозии почвы по общей площади и массе эродированных земель

	Класс эрозии почвы	Площадь		Среднегодовые потери почвы	
		%	га	%	10^6 т
1958–1988	<0,5 (неопасная)	75,4%	19500	15,7%	3,71
	0,5–1 (слабо опасная)	10,7%	2750	11,4%	2,70
	1–5 (средне опасная)	12,1%	313	36,2%	8,57
	5–10 (сильно опасная)	1,1%	282	11,2%	2,65
	>10 (чрезвычайно опасная)	0,70%	182	25,6%	6,06
1989–2018	<0,5 (неопасная)	76,7%	19800	18,5%	3,83
	0,5–1 (слабо опасная)	9,8%	2530	12,0%	2,49
	1–5 (средне опасная)	12,3%	319	41,8%	8,65
	5–10 (сильно опасная)	0,83%	214	9,5%	1,96
	>10 (чрезвычайно опасная)	0,37%	94,5	18,2%	3,77

мальности дождевых осадков в ряде районов Крыма [Voskresenskaya, Vyshkvarkova, 2016].

Согласно выполненным оценкам, среднегодовые потери почвы в период до 1988 г. составляли 23,7 млн т при средней скорости эрозии порядка $0,67 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ и 20,7 млн т при средней скорости эрозии порядка $0,58 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ в период после 1989 г., что в целом соответствует характеру изменений определяющих параметров поверхностного смыва. Полученные величины соответствуют результатам расчетов для Крыма, приводимых в работе [Borrelli et al., 2022].

В целом выполненные расчеты не обнаруживают значительных изменений в пространственном распределении эрозии почвы. В 1958–1988 гг. порядка 3590 га (или 13,9% территории) были подвержены риску эрозии почв от средне опасного до чрезвычайно опасного, в то время как для периода 1989–2018 гг. эта величина составила порядка 3490 га, или 13,5%. Полученные выводы не соответствуют оценкам, приводимым в работе [Черный, Ергина, 2010], где площадь подверженных водной эрозии земель только для двух районов полуострова превышает 150 тыс. га.

Распределение коэффициента вариации и средневзвешенных значений темпов эрозии (рис. 10) указывает на то, что наибольшая изменчивость и относительная величина эрозии характерны для во-

досборов рек, дренирующих склоны Крымских гор. При этом для южных склонов хребта характерны более высокие значения коэффициента вариации ($>1,5$), чем для северных, при одинаково больших величинах средневзвешенных темпов эрозии почв ($>5 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$). По мере выполаживания рельефа уменьшается вариация темпов эрозии, так, для всей западной части полуострова характерны значения C_v меньше 1,5. Восточная же часть полуострова обеспечена малыми величинами эрозии почв при их большой изменчивости (рис. 10).

Такое пространственное распределение эрозии почв обусловлено изменчивостью основных ее факторов: эрозионного потенциала осадков R , длины и крутизны склонов LS и типа землепользования S . Эродируемость почв Крымского полуострова относительно слабо изменчива в пространстве (рис. 7). Картосхема на рис. 11 отражает относительную вариабельность каждого из перечисленных факторов. Детальный анализ данной картосхемы указывает на то, что преобладающим фактором эрозии в горной части Крыма, обеспечивающим высокие среднегодовые темпы смыва, является фактор LS ($>0,7$). В центральной и северной частях Крыма преобладающим фактором эрозии является активное землепользование, именно на этой равнинной части располагаются основные сельскохозяйственные угодья. В восточной части полу-

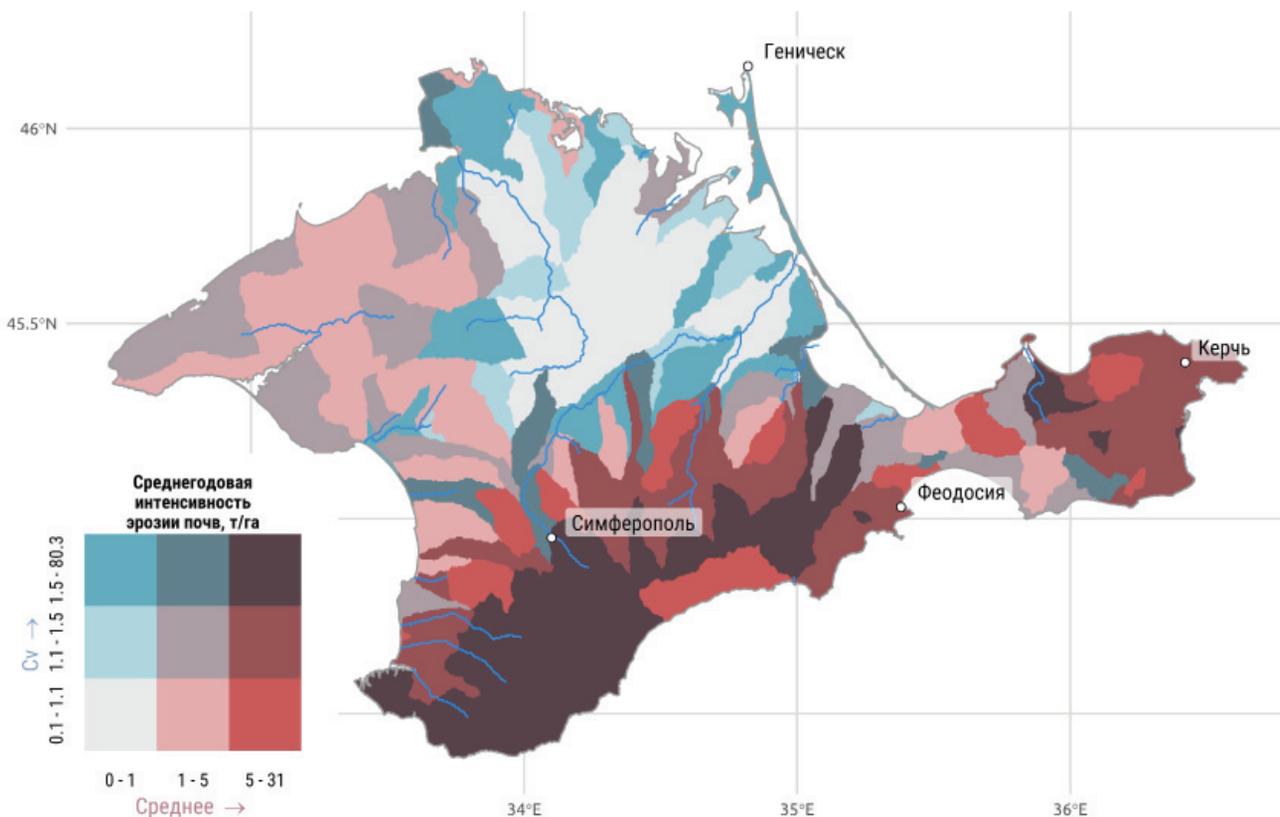


Рис. 10. Распределение средних величин и коэффициента вариации C_v среднегодовой интенсивности эрозии почв в Крыму

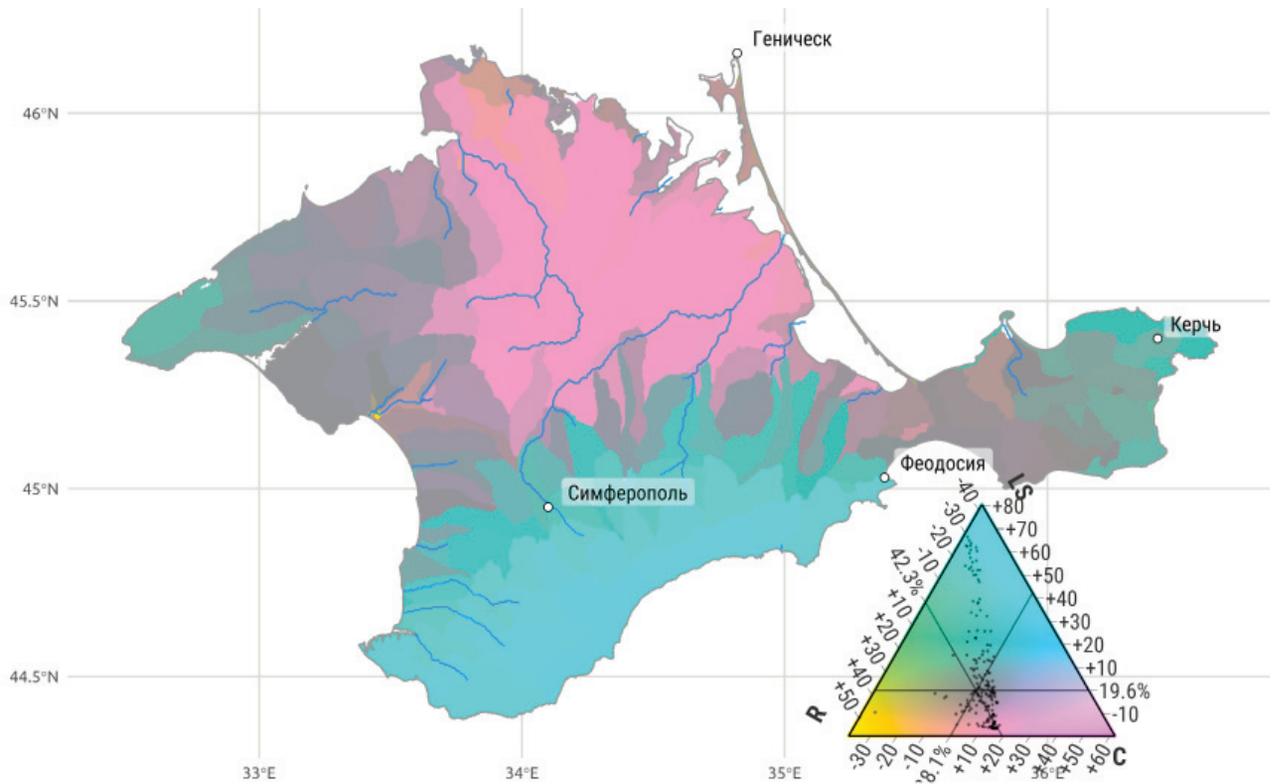


Рис. 11. Относительное распределение факторов эрозии почв из уравнения *RUSLE* — эрозионного потенциала осадков *R*, фактора длины и крутизны склонов *LS* и фактора землепользования *C*.

Использована тройная шкала, отражающая относительное изменение средних величин по подбассейнам HydroSheds. Желтые области характеризуют районы с большими значениями *R*, фиолетовые — *C*, голубые — *LS*

острова в районе г. Керчь эрозия почв определяется одновременно высокими значениями факторов *R* ($> 600 \text{ МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) и *LS* ($> 0,5$).

Верификация полученных оценок. Валидация и верификация моделей эрозии почвы представляет собой комплексную и сложную задачу, требующую продолжительных многолетних наблюдений на ключевых участках [Лисецкий и др., 2012]. На региональном уровне обычно проводится визуальное и количественное сравнение с данными спутниковых снимков, карт эрозии и других эрозионных моделей [Borrelli et al., 2017; Bosco et al., 2015]. Традиционно эрозионные модели разрабатываются для близких к субгоризонтальным участкам поверхности с короткими склонами с небольшими уклонами, в то время как количество исследований для склонов с градиентом более 50% весьма ограничено [Nearing, 1997]. В связи с этим оценка скоростей потерь почвы в горных районах представляет собой очень сложную задачу, хотя опыт их использования в условиях горного рельефа указывает на возможность их применения [Schönbrodt et al., 2010].

При сравнении результатов расчетов эрозии почвы, выполненных на основе данных ЦМР 250 м и 90 м, следует ожидать увеличения скорости смыва почв в 1,7–1,8 раз [Wu, Huang, 2005], что преимущественно связано с тем фактом, что длина и крутизна

склонов являются ключевыми факторами эрозии [Zingg, 1940; Desmet, Govers, 1995].

С целью верификации полученных результатов расчетов поверхностного смыва почвы было произведено сопоставление величин эрозии в замыкающих створах изученных водосборов с фактическим (измеренным на стационарных гидрологических постах) стоком взвешенных наносов для 15 постов для реках Крыма. При выполнении такого сравнения стоит учитывать, что поверхностный смыв не включает в себя оценку других источников поступления наносов, в том числе результат деятельности различных гравитационных процессов (оползней, обвалов, осыпей), русловую эрозию, вклад которых может быть значительным в сравнении с величиной бассейновой эрозии. Кроме того, модуль стока взвешенных наносов в замыкающих створах рек не учитывает долю материала, транспортируемого во влекомом состоянии, хотя его доля для рек в различных природных условиях может достигать 70% и более [Копалиани, 1985; Чалов, 2007]. Выполненные оценки соотношения фактического стока взвешенных наносов в замыкающих створах рек и величины поверхностного смыва на водосборе (рис. 12) указывают на то, что для абсолютного большинства водосборов Крымского полуострова, освещенных данными стационарных наблюдений, характерно

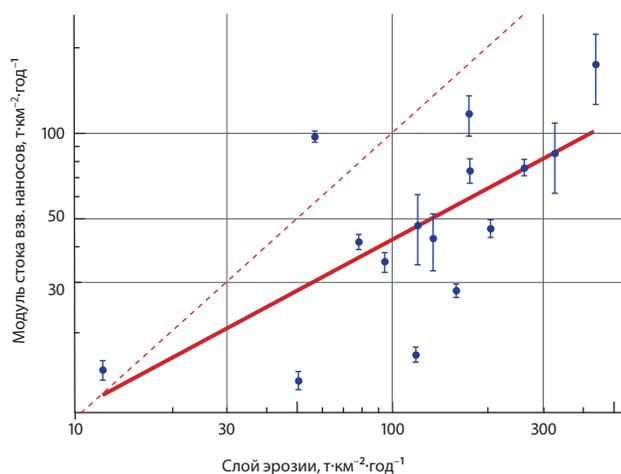


Рис. 12. Соотношение среднегогодового стока взвешенных наносов и величин поверхностного смыва в бассейнах рек Крыма за период 1958–1988 гг.

Усыками показан диапазон стандартных ошибок.

Средние значения и стандартные ошибки рассчитаны для всего периода наблюдений.

Сплошной линией показана линейная регрессия, пунктиром — средняя линия

значительное превышение величин поверхностного смыва почвы над стоком взвешенных наносов в замыкающих створах рек. Это соотношение составляет порядка 10–50%, т. е. доля наносов, достигающая устьевых створов, не превышает 50%. Однако для некоторых водосборов (рр. Бельбек, Черная) наблюдается обратная картина, когда фактический сток взвешенных наносов рек оказывается выше водной эрозии на водосборе. Подобная ситуация может быть интерпретирована по-разному. С одной стороны, такая картина указывает на возможные неточности входных параметров расчетной модели, что особенно касается горных территорий и требует более детальной верификации на местности. С другой стороны, это может свидетельствовать о преобладании русловой эрозии над бассейновой в данных водотоках, что может быть также связано с дефицитом наносов в нижних бьефах водохранилищ.

Заключение

В данной работе впервые приводится крупномасштабная оценка водной эрозии почвы на основе универсального уравнения эрозии почвы *RUSLE* на территории Крымского полуострова для двух периодов 1958–1988 и 1989–2018 гг. с использованием наилучших доступных входных данных. Наиболее эродированные земли расположены в пределах Южного берега Крыма (ЮБК), что определяется сочетанием высоких значений факторов *LS* (эрозионного потенциала рельефа) и *R* (эрозионного потенциала осадков).

Установлено некоторое снижение (на 13%) темпов смыва почв для рассматриваемых периодов,

что может быть связано с сокращением доли сельскохозяйственных обрабатываемых земель после распада СССР. Доля почв, подверженных уровню эрозии от средне опасного до чрезвычайно опасного, при этом уменьшилась всего на 0,4%. Полученные значения темпов эрозии для исследуемого региона соответствуют оценкам, полученным при мелкомасштабном районировании для Крыма, и в среднем составляют менее $1 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$.

Сопоставление величины поверхностного смыва почв на водосборе с фактическими значениями расходов взвешенных наносов в замыкающих створах рек Крыма показало, что для большинства из них характерен режим аккумуляции, когда выносится порядка 10–50% продуктов эрозионного смыва.

Информация о финансировании работы

Исследование выполнено по плану НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (№ 121051200166-4 — сбор и анализ данных стационарных наблюдений) при финансовой поддержке РФФИ, проект номер 20-35-70035 (сбор и анализ данных о факторах формирования водной эрозии почвы).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М., 1998.
2. Клюкин А.А. Экзогеодинамика Крыма. Симферополь, 2007.
3. Клюкин А.А. Экстремальные проявления неблагоприятных и опасных экзогенных процессов в XX веке в Крыму // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2005.
4. Копалиани З.Д. О соотношении расходов донных наносов и взвешенных наносов в реках // Гидрофизические процессы в реках и водохранилищах. 1985.
5. Куксина Л.В., Белякова П.А., Голосов В.Н. и др. Стохастические факторы формирования внезапных ливневых паводков на Черноморском побережье Западного Кавказа и Крыма // Изв. РГО. 2023. Т. 155, № 2.
6. Куксина Л.В., Голосов В.Н., Жданова Е.Ю. и др. Гидролого-климатические факторы формирования экстремальных эрозионных событий в Горном Крыму // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2021. № 5.
7. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв. М., 1993.
8. Лисецкий Ф.Н., Светличный А.А., Черный С.Г. Современные проблемы эрозиоведения. Белгород, 2012.

9. Михайлов В.Н., Добролюбов С.А. Гидрология. М., Берлин, 2017.
10. Нестеренко В.П. Закономерности формирования климатических изменений и их прогноз на территории Крыма // Научные ведомости БелГУ. Сер.: Естественные науки. 2016.
11. Региональная программа защиты почв Республики Крым от водной и ветровой эрозии и других видов деградации. Симферополь, 1995.
12. Сташкина А.Ф. Почвы восточного региона Крымских гор и их пригодность к ведению аграрного и садово-паркового производства // Вісник ХНАУ. Серія: Рослинництво, селекція і насінництво, глодоовочівництво. 2012. № 2.
13. Чалов Р.С. Руслведение: теория, география, практика. Т.1: Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М., 2007.
14. Черный С.Г., Ергина Е.И. К вопросу о классификации эродированных почв Крыма // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2010. Вып. 1.
15. Abatzoglou J.T., Dobrowski S.Z., Parks, S.A. et al. TerraClimate, a High-Resolution Global Dataset of Monthly Climate and Climatic Water Balance from 1958–2015 // Sci. Data. 2018. № 5.
16. Benavidez R., Jackson B., Maxwell D. et al. Review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): With a View to Increasing Its Global Applicability and Improving Soil Loss Estimates // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2018. № 22.
17. Borrelli P., Ballabio C., Yang J.E. et al. GloSEM: High-resolution global estimates of present and future soil displacement in croplands by water erosion // Sci Data. 2022. № 9.
18. Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R. et al. An Assessment of the Global Impact of 21st Century Land Use Change on Soil Erosion // Nat. Commun. 2017. № 8.
19. Bosco C., de Rigo D., Dewitte O. et al. Modelling Soil Erosion at European Scale: Towards Harmonization and Reproducibility // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2015. № 15.
20. Desmet P.J.J., Govers G. GIS-Based Simulation of Erosion and Deposition Patterns in an Agricultural Landscape: A Comparison of Model Results with Soil Map Information // Catena. 1995. № 25.
21. Ergina E.I., Tronza G.E., Shevchenko I.M. et al. Current nature and problems of agricultural land management in the Republic of Crimea // E3S Web of Conferences. 2020. № 224.
22. Fenta A.A., Tsunekawa A., Haregeweyn N. et al. Land Susceptibility to Water and Wind Erosion Risks in the East Africa Region // Sci. Total Environ. 2020. № 703.
23. Griffin M.L., Beasley D.B., Fletcher J.J. et al. Estimating soil loss on topographically non-uniform field and farm units // Journal of soil and water conservation. 1988. № 43.
24. Haregeweyn N., Tsunekawa A., Poesen J. et al. Comprehensive Assessment of Soil Erosion Risk for Better Land Use Planning in River Basins: Case Study of the Upper Blue Nile River // Sci. Total Environ. 2017. № 574.
25. Hartvigsen M. Land Reform and Land Fragmentation in Central and Eastern Europe // Land Use Policy. 2014. № 36.
26. Hengl T., Jesus J.M., Heuvelink G.B.M. et al. SoilGrids250m: Global Gridded Soil Information Based on Machine Learning // PLOS ONE. 2017. № 12.
27. Lesiv M., Schepaschenko D., Moltchanova E. et al. Spatial Distribution of Arable and Abandoned Land across Former Soviet Union Countries // Sci. Data. 2018. № 5.
28. Liu H., Wang L. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling // Int. J. Geog. Inf. Sci. 2006. № 20.
29. Monfreda C., Ramankutty N., Foley J.A. Farming the Planet: 2. Geographic Distribution of Crop Areas, Yields, Physiological Types, and Net Primary Production in the Year 2000 // Glob. Biogeochem. Cycles. 2008. № 22.
30. Nearing M.A. A Single, Continuous Function for Slope Steepness Influence on Soil Loss // Soil Sci. Soc. Am. J. 1997. № 61.
31. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. et al. Estimating the Soil Erosion Cover-Management Factor at the European Scale // Land Use Policy. 2015. № 48.
32. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A. et al. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington DC, 1997.
33. Schönbrodt S., Saumer P., Behrens T. et al. Assessing the USLE crop and management factor C for soil erosion modeling in a large mountainous watershed in Central China // J. Earth Science. 2010. Vol. 21. № 6.
34. Tamene L., Le, Q.B. Estimating Soil Erosion in Sub-Saharan Africa Based on Landscape Similarity Mapping and Using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) // Nutr. Cycl. Agroecosystems. 2015. № 102.
35. Tsendbazar N.E., Herold M., de Bruin S. et al. Developing and applying a multi-purpose land cover validation dataset for Africa // Remote Sens. Environ. 2018. № 219.
36. Voskresenskaya E., Vyshkvarkova E. Extreme precipitation over the Crimean peninsula // Quaternary International. 2016. № 409.
37. Vrieling A., Sterk G., de Jong S.M. Satellite-Based Estimation of Rainfall Erosivity for Africa // J. Hydrol. 2010. № 395.
38. Wilson J.P. Estimating the topographic factor in the universal soil loss equation for watersheds // J. of soil and water conservation. 1986. № 41.
39. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. Maryland, 1978.
40. Wischmeier W.H., Smith D.D., Uhland R.E. Evaluation of factors in the soil loss equation // Agricultural Engineering. 1958. № 8.
41. Wu S., Li J., Huang G. An Evaluation of Grid Size Uncertainty in Empirical Soil Loss Modeling with Digital Elevation Models // Environ. Model. Assess. 2005. № 10.
42. Zingg A.W. Degree and length of land slope as it affects soil loss in run-off // Agric Engng. 1940. № 21.

Поступила в редакцию 26.02.2024

После доработки 26.04.2024

Принята к публикации 06.05.2024

SPATIAL AND TEMPORAL PATTERN OF SOIL EROSION IN CRIMEA

A. S. Tsyplenkov, L. V. Kuksina

In the paper spatial and temporal variability of soil erosion for the periods of 1958–1988 and 1989–2018 is estimated on the basis of RUSLE in Crimea. Erosion rates vary from very slight to very high in the region. Strongly eroded areas are found in the mountainous regions in the Southern Crimea, mainly attributable to a combination of a high rainfall erosivity (R-factor) and relatively steep slopes (LS-factor). Soil loss in 1958–1988 exceeded the values in 1989–2018 on approximately 13%, while the share of moderate, high and very high-eroded areas varied within the range of less than 1%. These changes are associated with both the reduction of agricultural cultivated lands and the variability of soil erosion factors. The soil erosion formation is mainly connected with the factors of rainfall erosivity, slope steepness as well as the cover-management factor in Crimea. Comparison of actual suspended sediment yield in the gauges with the values of soil erosion demonstrated that most rivers area characterized by the accumulation of eroded material when 10–50% of the washed products reach the gauges.

Keywords: RUSLE, universal soil loss equation, sediment yield, rainfall erosivity, slope steepness, soil erodibility, zoning.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Цыпленков Анатолий Сергеевич, канд. геогр. наук, ст. науч. сотр. НИЛ эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева,
e-mail:atsyplenkov@gmail.com

Куксина Людмила Вячеславовна, канд. геогр. наук, ст. науч. сотр. НИЛ эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева,
e-mail: ludmilakuksina@gmail.com