

## Моделирование водной эрозии с использованием уравнения RUSLE в масштабе землепользования

А. С. Кузнецова<sup>1</sup>, К. В. Краснощеков<sup>1</sup>, А. В. Дергунов<sup>1</sup>, М. Г. Ерунова<sup>1</sup>,  
Д. С. Макаров<sup>1</sup>, Д. В. Харламов<sup>1</sup>, О. Э. Якубайлик<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, 660036, Россия  
E-mail: anna.simakina.97@mail.ru

<sup>2</sup> Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Красноярск, 660036, Россия

Данное исследование направлено на моделирование водной эрозии почвенного покрова и её оценку в масштабе землепользования. В качестве объекта исследования выбрано опытно-производственное хозяйство (ОПХ) «Михайловское». Для вычисления среднегодовой скорости потери почвы и пространственного распределения водной эрозии применялось уравнение RUSLE совместно с наземными данными и данными дистанционного зондирования Земли. В качестве исходных данных использованы цифровая модель рельефа FABDEM, спутниковые данные Sentinel-2, данные с наземной метеорологической станции и цифровые карты, представляющие собой результаты наземных обследований землепользования. В ходе исследования был разработан алгоритм вычисления факторов уравнения RUSLE. В геоинформационных системах QGIS и ArcGIS впервые построены цифровые карты, отображающие эродруемость почвы, влияние топографии местности на водную эрозию почвы, потерю почвы из-за типа земного покрова и практику поддержки и сохранения почвенного покрова. В результате моделирования водной эрозии почвенного покрова ОПХ «Михайловское» получена цифровая карта среднегодовой скорости потери почвы. По оценке полученной карты установлено, что почвы данного землепользования в целом характеризуются незначительной эрозионной опасностью.

**Ключевые слова:** эрозия почвы, сельское хозяйство, RUSLE, моделирование водной эрозии, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 15.05.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-145-154

### Введение

Водная эрозия пахотных земель — одна из важных проблем в сельском хозяйстве. Она приводит к потере верхнего плодородного слоя почвы и снижению доступности воды для растительности (Petito et al., 2022), оказывает негативное влияние на качество и объём урожая сельскохозяйственных культур. Для решения данной проблемы необходимо осуществлять моделирование водной эрозии почвенного покрова и её оценку в масштабе отдельных сельскохозяйственных землепользований. Такого рода сведения смогут оказать информационную поддержку при разработке и внедрении стратегий по землеустройству и адаптивному управлению землепользованием.

Общие подходы к моделированию водной эрозии почвенного покрова включают использование многочисленных уравнений, таких как универсальное уравнение потерь почвы (англ. Universal Soil Loss Equation — USLE) (Wischmeier, Smith, 1978), пересмотренное универсальное уравнение потерь почвы (англ. Revised Universal Soil Loss Equation — RUSLE) (Renard et al., 1997), стационарное уравнение непрерывности потока (Lafren et al., 1991) и др. (Pandey et al., 2016). Широкое применение во всём мире приобрело уравнение RUSLE (Bircher et al., 2022; Nguyen et al., 2023; Räsänen et al., 2023). Данное уравнение основывается на анализе климатических условий, эродруемости почвы, рельефа местности, растительного покрова, типов землепользования и используется для эрозионного моделирования почвенного покрова пахотных земель (Renard et al., 1997).

Интеграция уравнения RUSLE с наземными данными и данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) способствует более точному моделированию водной эрозии почвенного покрова. Данные с наземных метеостанций предоставляют информацию о климатических условиях местности. Наземные обследования обеспечивают землепользования детальными картографическими и текстовыми материалами о почвенном покрове, гранулометрическом и агрохимическом составе почв, устройстве агропредприятия и др. Данные ДЗЗ, в свою очередь, позволяют уточнять и корректировать результаты наземных обследований (Ерунова и др., 2022), получать разнообразную информацию о землепользовании с высоким пространственным разрешением (la Cecilia et al., 2023; Marino, 2023), а также изучать рельеф землепользований на основе цифровых моделей рельефа (ЦМР) (Шинкаренко и др., 2019; Liu et al., 2023).

В рамках уравнения RUSLE анализ рельефа землепользований становится ключевым фактором, влияющим на пространственное распределение водной эрозии почв (Räsänen et al., 2023). Среди распространённых ЦМР глобального масштаба, находящихся в открытом доступе, таких как Multi-Error-Removed Improved-Terrain (MERIT) DEM (с разрешением ~90 м), Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (с разрешением ~30 м) и др. (Uuemaa et al., 2020) наиболее новой и точной ЦМР считается Forest And Buildings removed Copernicus DEM (FABDEM) (Hawker et al., 2022). Модель FABDEM — первая глобальная ЦМР, в которой удалена высота деревьев и зданий.

Цель исследования заключается в моделировании и оценке водной эрозии почвенного покрова в масштабе землепользования с использованием уравнения RUSLE на основе наземных данных и данных ДЗЗ.

### Объект исследования

Исследования проводились в опытно-производственном хозяйстве (ОПХ) «Михайловское», которое входит в состав Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН). Территория хозяйства расположена в северо-западной части Ужурского р-на, в 250 км от г. Красноярска (рис. 1). Общая площадь ОПХ составляет 15 298 га, в том числе площадь пашни — 8605 га.

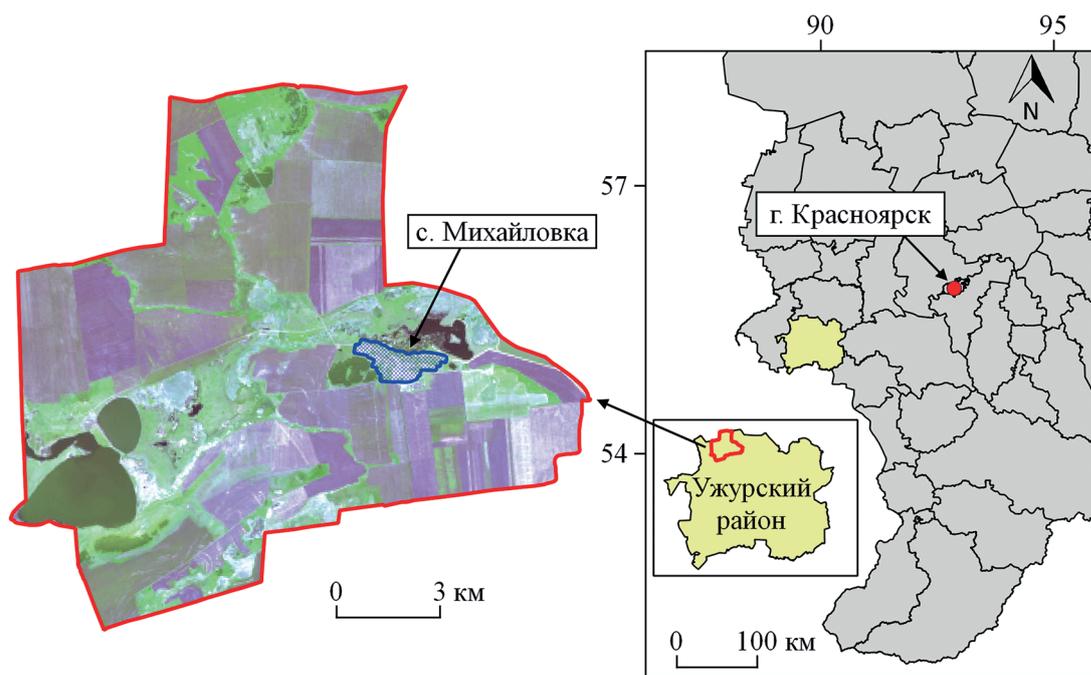


Рис. 1. Расположение ОПХ «Михайловское»

Территория ОПХ находится в лесостепной зоне Причулымья. Климат резко континентальный с холодной продолжительной зимой и умеренно-прохладным летом. Период со среднесуточной температурой выше 10 °С составляет 107 дней. Сумма положительных температур за этот период равна 1628 °С. Среднегодовая температура воздуха равна –1 °С. Продолжительность вегетационного периода составляет 153 дня. Среднегодовая сумма осадков равна 400 мм.

Почвенный покров ОПХ представлен серыми лесными почвами, чернозёмами, лугово-чернозёмными, луговыми и болотными почвами. Почти половина территории занята чернозёмным (69 %) типом почв, которые рассредоточены по всему землепользованию. Это самые плодородные почвы со среднемощным гумусовым горизонтом. Второе место в структуре почвенного покрова занимают луговые почвы (21 %), далее идут лугово-чернозёмные почвы (13 %).

Актуальная информация об устройстве ОПХ «Михайловское» в цифровом формате содержится в базе геопространственных данных (БГД). Данная БГД создана по аналогии с БГД ОПХ «Курагинское» (Ерунова и др., 2022) на основе данных ДЗЗ, результатов наземного мониторинга, а также материалов почвенных и агрохимических обследований. Эта база включает в себя цифровые карты, на которых отражена следующая информация: расположение полей землепользования; сведения о свойствах почвы (содержание гумуса, гранулометрический состав); сведения о севооборотах и возделываемых культурах; сведения о типах землепользования и т. д.

## Материалы и методы

Моделирование водной эрозии почвенного покрова для территории исследования осуществлялось при помощи уравнения RUSLE (Renard et al., 1997):

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P, \quad (1)$$

где  $A$  — расчётная среднегодовая скорость потерь почвы ( $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ );  $R$  — фактор эрозионной активности осадков ( $\text{МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ );  $K$  — фактор эродуемости почвы ( $\text{т} \cdot \text{ч} \cdot \text{МДж}^{-1} \cdot \text{мм}^{-1}$ );  $LS$  — топографический фактор (без единицы измерения);  $C$  — фактор управления растительным покровом (без единицы измерения);  $P$  — фактор практики поддержки и сохранения (без единицы измерения). На рис. 2 (см. с. 148) представлен алгоритм вычисления факторов уравнения RUSLE в виде блок-схемы. Более подробное описание вычисления каждого фактора приведено ниже.

Фактор эрозионной активности осадков ( $R$ ) рассчитывался по формуле (Renard, Freimund, 1994):

$$R = 0,0483 P^{1,61},$$

где  $P$  — среднее годовое количество осадков. Данные о количестве осадков были взяты с метеостанции, расположенной в г. Ужур Красноярского края. По данным с метеостанции среднегодовое количество осадков за 2023 г. составило 359 мм.

Источником данных для вычисления фактора эродуемости почвы ( $K$ ) выступает БГД ОПХ «Михайловское». Подробная информация о почвах землепользования была получена из цифровой почвенной карты, составленной на основе изучения и картографирования почв, проведённого в 1976 г.

Фактор  $K$  рассчитывался по методу EPIC (англ. Erosion productivity impact calculator) по формуле (Sharply, Williams, 1990):

$$K = \frac{1}{7,6} \left\{ 0,2 + 0,3 \exp \left[ -0,0256 SAN \left( 1 - \frac{SIL}{100} \right) \right] \right\} \left( \frac{SIL}{CLA + SIL} \right)^{0,3} \times \left\{ 1 - \frac{0,25 OM}{OM + \exp(3,72 - 0,95 OM)} \right\} \cdot \left\{ 1 - \frac{0,75 SN}{SN + \exp(-5,51 + 22,9 SN)} \right\},$$

где  $SAN$ ,  $SIL$ ,  $CLA$  — содержание песка, ила и глины (в %) соответственно;  $OM$  — содержание органических веществ в почве (в %);  $SN = 1 - SAN/100$ .

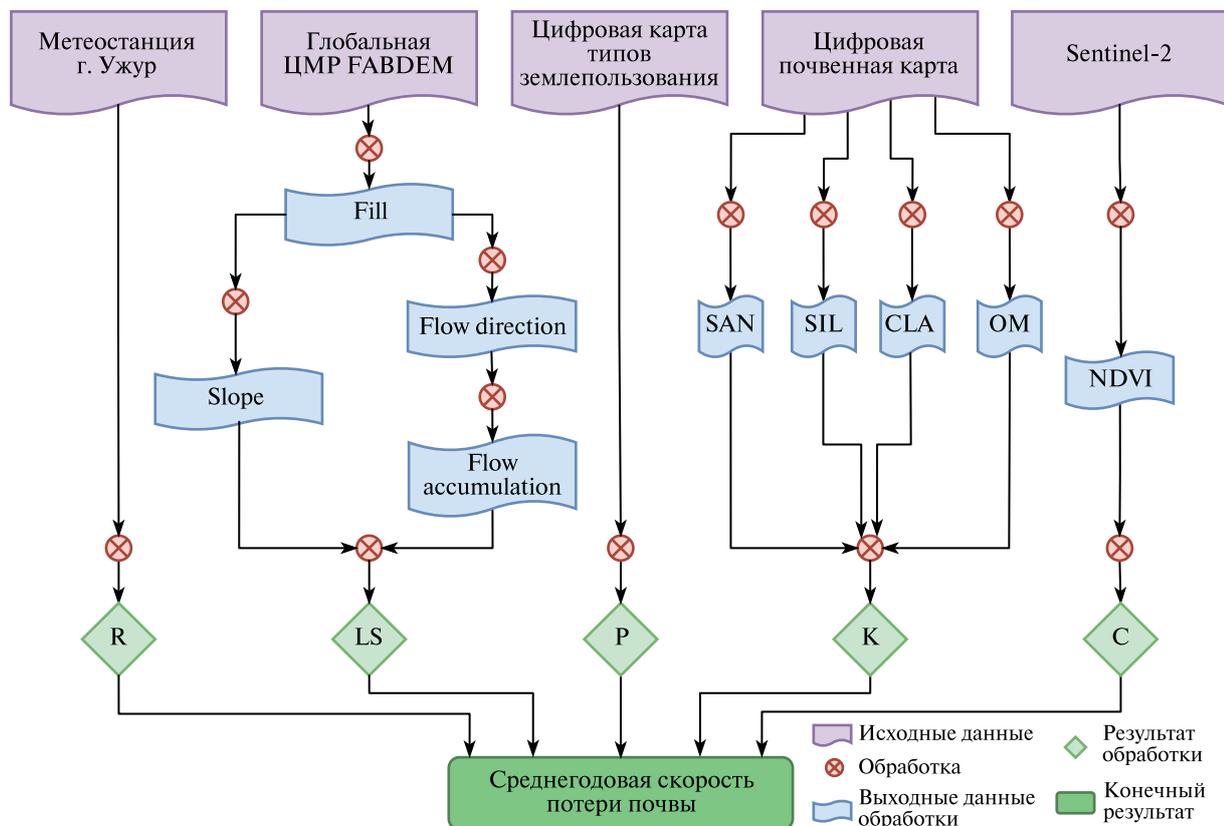


Рис. 2. Алгоритм вычисления факторов уравнения RUSLE

Топографический фактор длины и крутизны склона ( $LS$ ) рассчитывался по формуле (Иванов, Ермолаев, 2017):

$$LS = (m + 1) \cdot \left( \frac{A_s}{22,13} \right)^m \sin \left( \frac{B}{0,0896} \right)^n,$$

где  $A_s$  — удельная площадь водосбора;  $B$  — локальное значение уклона (в град),  $m$  — показатель площади, который принимается равным 0,4;  $n$  — показатель уклона, который принимается равным 1,3 (Moore et al., 1991).

Фактор  $LS$  получен на основе ЦМР FABDEM, распространяемой с шагом сетки в 1 угл. с (приблизительно 30 м на экваторе) (Hawker et al., 2022). Для этого предварительно по скорректированной ЦМР FABDEM в геоинформационной системе (ГИС) ArcGIS построены топографические слои удельной площади водосбора и уклона местности.

Фактор управления растительным покровом ( $C$ ) указывает на потерю почвы из-за типа земного покрова, определённого с использованием нормализованного вегетационного индекса NDVI (англ. Normalized difference vegetation index) по формуле (Durigon et al., 2014):

$$C = 0,1 \left| \frac{-NDVI + 1}{2} \right|.$$

Для расчёта фактора  $C$  использован безоблачный спутниковый снимок Sentinel-2 (пространственное разрешение 10 м) от 24 августа 2023 г. Данный снимок был выбран таким образом, чтобы минимизировать влияние сельскохозяйственных культур. В конце августа растительность вне пахотных земель ещё цветёт, а выращиваемые сельскохозяйственные культуры уже были убраны с полей.

Значения фактора  $P$  по типу землепользования ОПХ «Михайловское»

Тип землепользования	Общая площадь, га	Фактор $P$	Источник
Пахотные земли	8830,31	0,4	(Wang et al., 2020)
Пастбища, кустарник	3549,11	0,8	(Haregeweyn et al., 2017)
Водно-болотные угодья	1238,62	0,9	
Лесная земля	434,08	1,0	(Nguyen et al., 2023)

В качестве источника данных для расчёта фактора природоохранной практики ( $P$ ) выступает БГД ОПХ «Михайловское». Векторные границы типов землепользования и их наименования были получены из цифровой карты типов землепользования, созданной на основе материалов почвенного обследования хозяйства и данных ДЗЗ. Каждому типу землепользования присвоены значения фактора  $P$  (таблица).

## Результаты и обсуждение

Расчитанные факторы уравнения RUSLE представляют собой четыре цифровые карты ( $K$ ,  $LS$ ,  $C$ ,  $P$ ) (рис. 3, см. с. 150) и одну переменную ( $R$ ), одинаковую для всей площади ОПХ «Михайловское». Среднегодовой фактор  $R$  составляет 629 МДж·мм·га<sup>-1</sup>·ч<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup>.

Фактор  $K$  определён как соотношение между классом текстуры почвы и органическим веществом почвы. Содержание песка, ила и глины в почвах ОПХ «Михайловское» установлено по механическому составу почв (глинистый, среднесуглинистый, тяжелоглинистый). Содержание органического вещества в почве определено на основе информации о гумусе (малогумусные, обыкновенные, среднегумусные, тучные). Полученные значения фактора  $K$  варьируются от 0,012 до 0,039 т·ч·МДж<sup>-1</sup>·мм<sup>-1</sup>. Значения фактора  $K$  по типам почвы определены следующим образом: луговые — 0,026, болотные — 0,039, чернозёмные от 0,012 до 0,029.

Фактор  $LS$  отображает влияние топографии местности на водную эрозию почвы. Его значения колеблются от 0 до 0,2. Большая часть (85 %) площади землепользования имеет значения  $LS$  менее 0,05. Остальные 15 % распределены по участкам с уклонами >3°, где наибольшие значения  $LS$  указывают на более высокий потенциал местности к эрозии почвы.

Значения фактора  $C$  варьируются в пределах от 0,02 до 0,05. Наименьшие значения характерны для растительности и лесного покрова. Наибольшие значения (>0,04) наблюдаются на территории, которая не имеет растительности (открытая почва, поля под пар, участки с крутыми склонами).

Фактор  $P$  учитывает методы природоохранных мер, которые приняты на территории исследования для изменения скорости и характера стока. Его значения варьируются от 0 до 1 в зависимости от типа землепользования. На территории ОПХ «Михайловское» преобладают пахотные земли (58 % от общей площади землепользования). Значение фактора  $P$  для данного типа землепользования составляет 0,4, поскольку на данных участках осуществляется практика сохранения почв (обработка почв, внесение удобрений), в отличие от других типов землепользования, в пределах которых практика сохранения почвы проводилась нерегулярно или вовсе отсутствовала. К таким типам землепользования относятся: пастбища и кустарник (23 %), водно-болотные угодья (8 %) и лесные земли (3 %), значения фактора  $P$  которых приближаются к единице.

Факторы были умножены в ГИС QGIS с использованием инструмента «калькулятор растров» согласно уравнению RUSLE (1). В результате получена цифровая карта, отображающая пространственное распределение среднегодовой скорости потери почвы на территории ОПХ «Михайловское» (рис. 4а, см. с. 151). Среднегодовая скорость потерь почвы на территории всего хозяйства составила от 0 до 0,1 т·га<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup>, средняя скорость равна 0,015 т·га<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup>. На основе эрозионного моделирования почвенный покров ОПХ «Михайловское» можно отнести к I классу эрозионной опасности (<5 т·га<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup>). Это свидетельствует о том, что данное землепользование представляется эталонным для ведения сельскохозяйственной

деятельности, поскольку водная эрозия почвенного покрова в пределах хозяйства является незначительной.

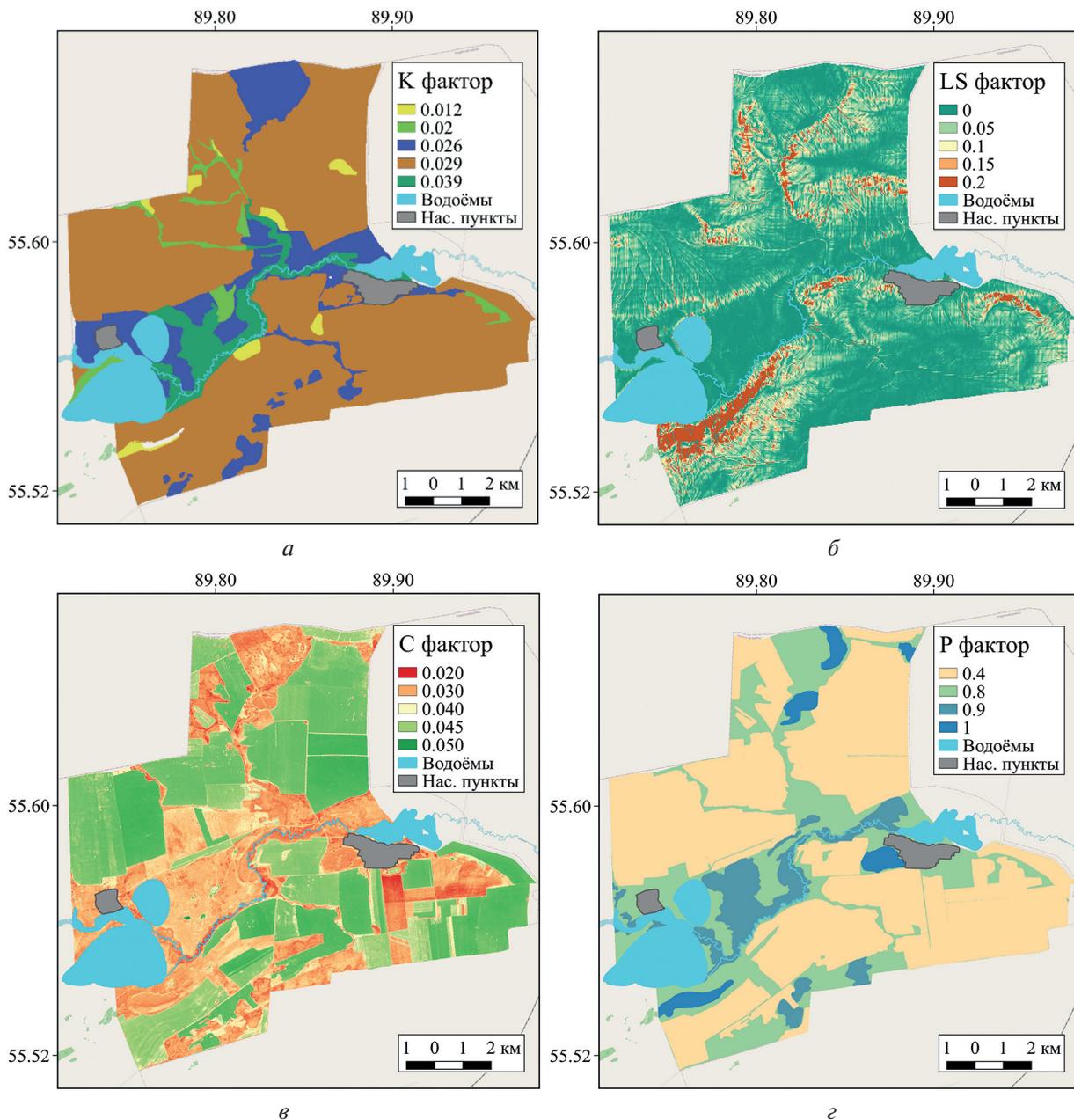


Рис. 3. Факторы уравнения RUSLE: а — фактор эродруемости почвы; б — топографический фактор; в — фактор управления растительным покровом; г — фактор практики поддержки и сохранения

Для каждого сельскохозяйственного поля ОПХ «Михайловское» были вычислены средние значения среднегодовой скорости потери почвы. Результат представлен в виде цифровой карты, сгруппированной в три класса (рис. 4б). Большая часть полей имеет небольшую среднегодовую скорость потери почвы ( $<0,014 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ ). Однако также присутствуют поля с наибольшими средними значениями среднегодовой скорости потери почвы. Они выделены в третий класс с диапазоном от  $0,014 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$  до  $0,059 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ . Различия в распределении водной эрозии внутри полевых участков во многом объясняются топографией. На полях, относящихся к третьему классу, наиболее часто встречаются участки с уклонами  $>3^\circ$ . Исходя из этого на данные поля необходимо обратить особое внимание при планировании севооборота и проведении технических операций.

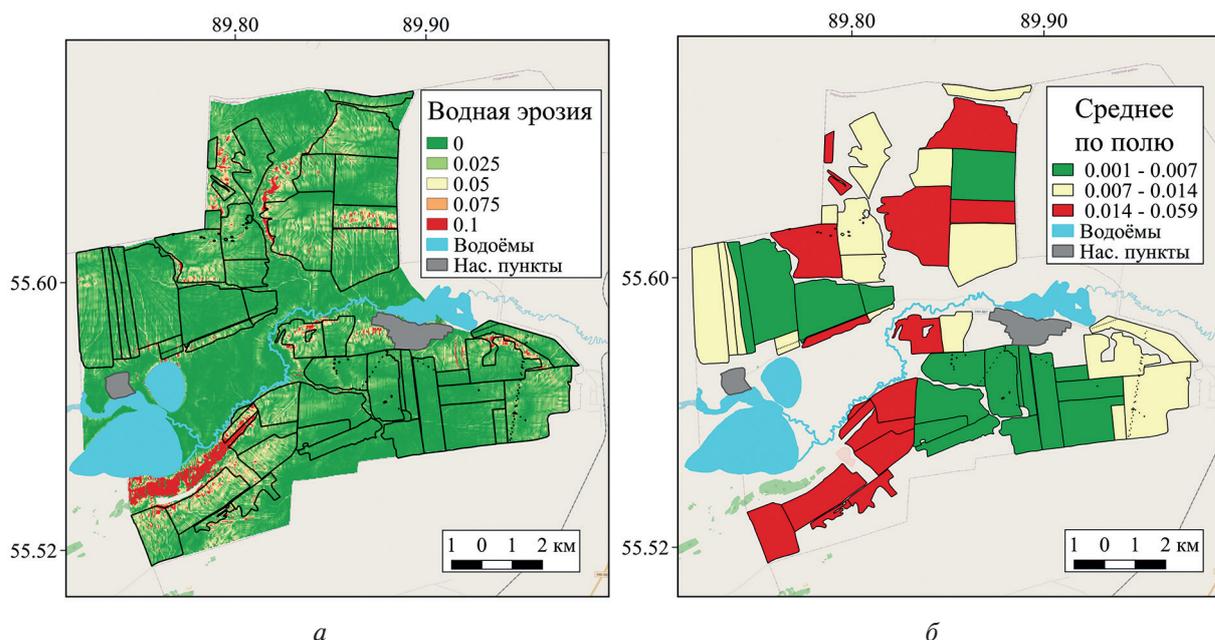


Рис. 4. Распределение среднегодовой скорости потери почвы: *а* — в пределах ОПХ «Михайловское» ( $\text{т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ ); *б* — среднее значение в пределах полей ( $\text{т}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ )

## Заключение

На основе наземных данных, цифровой модели рельефа FABDEM и спутниковых данных Sentinel-2 с использованием уравнения RUSLE проведено моделирование водной эрозии почвенного покрова в масштабе ОПХ «Михайловское». В ходе выполнения работ был сформирован алгоритм по вычислению факторов уравнения RUSLE. На территорию хозяйства впервые подготовлены цифровые карты, на которых отображена следующая информация: сведения о эродируемости почвы, влияние топографии местности на водную эрозию почвы, потеря почвы из-за типа земельного покрова, практика поддержки и сохранения почвенного покрова, а также пространственное распределение среднегодовой скорости потери почвы для данного землепользования.

В результате оценки эрозионного моделирования почвенного покрова ОПХ «Михайловское» было определено, что почвы данного землепользования в целом характеризуются незначительной эрозионной опасностью. Однако среди сельскохозяйственных угодий выделены поля с наиболее высоким потенциалом местности к развитию водной эрозии почвы.

## Литература

1. Ерунова М. Г., Симакина А. С., Якубайлик О. Э. Создание базы данных для точного земледелия ОПХ «Курагинское» // Вестн. КрасГАУ. 2022. № 1(178). С. 13–20. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-1-13-20.
2. Иванов М. А., Ермолаев О. П. Геоморфометрический анализ бассейновых геосистем Приволжского федерального округа по данным SRTM и Aster GDEM // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 98–109. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-98-109.
3. Шинкаренко С. С., Бодрова В. Н., Сидорова Н. В. Влияние экспозиции склонов на сезонную динамику вегетационного индекса NDVI посевных площадей // Изв. Нижневолжского агробиоуниверситета. комплекс: Наука и высшее профессион. образование. 2019. № 1. С. 96–105. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-01-12.
4. Bircher P., Liniger H. P., Prasuhn V. Comparison of long-term field-measured and RUSLE-based modelled soil loss in Switzerland // Geoderma Regional. 2022. V. 31. Article e00595. DOI: 10.1016/j.geodrs.2022.e00595.

5. Durigon V. L., Carvalho D. F., Antunes M. A. H. et al. NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed // Intern. J. Remote Sensing. 2014. V. 35. Iss. 2. P. 441–453. DOI: 10.1080/01431161.2013.871081.
6. 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 // Science of the Total Environment. 2017. V. 574. P. 95–108. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.019.
7. Hawker L., Uhe P., Paulo L. et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // Environmental Research Letters. 2022. V. 17. No. 2. Article 024016. DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.
8. la Cecilia D., Tom M., Stamm C., Odermatt D. Pixel-based mapping of open field and protected agriculture using constrained Sentinel-2 data // ISPRS Open J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2023. V. 8. Article 100033. DOI: 10.1016/j.ophoto.2023.100033.
9. Laflen J. M., Lane L. J., Foster G. R. WEPP: a new generation of erosion prediction technology // J. Soil and Water Conservation January. 1991. V. 46. No. 1. P. 34–38.
10. Liu J., Yang K., Tariq A. et al. Interaction of climate, topography and soil properties with cropland and cropping pattern using remote sensing data and machine learning methods // The Egyptian J. Remote Sensing and Space Sciences. 2023. V. 26. Iss. 3. P. 415–426. DOI: 10.1016/j.ejrs.2023.05.005.
11. Marino S. Understanding the spatio-temporal behavior of crop yield, yield components and weed pressure using time series Sentinel-2-data in an organic farming system // European J. Agronomy. 2023. V. 145. Article 126785. DOI: 10.1016/j.eja.2023.126785.
12. Moore I. D., Grayson R. B., Ladson A. R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications // Hydrological Processes. 1991. V. 5. Iss. 1. P. 3–30. DOI: 10.1002/HYP.3360050103.
13. Nguyen Q.-V., Liou Y.-A., Nguyen K.-A., Tran D.-P. Enhancing basin sustainability: Integrated RUSLE and SLCC in land use decision-making // Ecological Indicators. 2023. V. 155. Article 110993. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110993.
14. Pandey A., Himanshu S. K., Mishra S. K., Singh V. P. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited // CATENA. 2016. V. 147. P. 595–620. DOI: 10.1016/j.catena.2016.08.002.
15. Petito M., Cantalamessa S., Pagnani G. et al. Impact of Conservation Agriculture on Soil Erosion in the Annual Cropland of the Apulia Region (Southern Italy) Based on the RUSLE-GIS-GEE Framework // Agronomy. 2022. V. 12. Iss. 2. Article 281. DOI: 10.3390/agronomy12020281.
16. Räsänen T. A., Tähtikarhu M., Uusi-Kämpä J. et al. Evaluation of RUSLE and spatial assessment of agricultural soil erosion in Finland // Geoderma Regional. 2023. V. 32. Article e00610. DOI: 10.1016/j.geodrs.2023.e00610.
17. Renard K. G., Freimund J. R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE // J. Hydrology. 1994. V. 157. Iss. 1–4. P. 287–306. DOI: 10.1016/0022-1694(94)90110-4.
18. Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U. S. Department of Agriculture, 1997. 404 p.
19. Sharply A. N., Williams J. R. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. U. S. Department of Agriculture Technical Bulletin, 1990. 235 p.
20. Uuemaa E., Ahi S., Montibeller B. et al. Vertical accuracy of freely available global digital elevation models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM) // Remote Sensing. 2020. V. 12. Iss. 21. Article 3482. DOI: 10.3390/rs12213482.
21. Wang L., Zhang F., Fu S. et al. Assessment of soil erosion risk and its response to climate change in the mid-Yarlung Tsangpo River region // Environmental Science and Pollution Research. 2020. V. 27. Iss. 12. P. 607–621. DOI: 10.1007/s11356-019-06738-y.
22. Wischmeier W. H., Smith D. D. Predicting rainfall erosion losses: A Guide to Conservation Planning. U. S. Department of Agriculture, 1978. 67 p.

## Modeling water erosion using the RUSLE equation at the land use scale

A. S. Kuznetsova<sup>1</sup>, K. V. Krasnoshchekov<sup>1</sup>, A. V. Dergunov<sup>1</sup>, M. G. Erunova<sup>1</sup>,  
D. S. Makarov<sup>1</sup>, D. V. Kharlamov<sup>1</sup>, O. E. Yakubailik<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Krasnoyarsk Science Center SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia  
E-mail: anna.simakina.97@mail.ru

<sup>2</sup> Institute of Computational Modelling SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia

This study models water erosion of soil cover and assesses it at the land use scale. The Mikhailovskoye experimental production farm (EPF) was chosen as the object of study. The RUSLE equation, together with ground and remote sensing data, was used to calculate the average annual soil loss rate and the spatial distribution of water erosion. The input data included the FABDEM digital elevation model, Sentinel-2 satellite data, ground-based weather station data and digital maps which represent the results of ground-based land use surveys. In this study, an algorithm for calculating the factors of the RUSLE equation was developed. For the first time, QGIS and ArcGIS software have created digital maps showing practice of supporting and saving soil cover, soil erodibility, the influence of topography on soil erosion by water and soil loss due to land cover type. As a result of modeling water erosion of the soil cover of the Mikhailovskoye EPF, a digital map of the average annual soil loss rate was obtained. Based on the analysis of the resulting map, it was established that the soils of the study area are generally characterized by an insignificant erosion hazard.

**Keywords:** soil erosion, agriculture, RUSLE, modeling of water erosion, remote sensing

Accepted: 15.05.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-145-154

## References

1. Erunova M. G., Simakina A. S., Yakubailik O. E., Database for precision farming at the Kuraginskoye agricultural experimental production facility, *Bulletin KrasSAU*, 2022, No. 1(178), pp. 13–20 (in Russian), DOI: 10.36718/1819-4036-2022-1-13-20.
2. Ivanov M. A., Yermolaev O. P., Geomorphometric analysis of river basins of the Volga Federal District using SRTM and Aster GDEM data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 98–109 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-98-109.
3. Shinkarenko S. S., Bodrova V. N., Sidorova N. V., Influence of the exhibition of the slopes on the seasonal dynamics of the vegetation industry NDVI index of area planted, *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*, 2019, No. 1, pp. 96–105 (in Russian), DOI: 10.32786/2071-9485-2019-01-12.
4. Bircher P., Liniger H. P., Prasuhn V., Comparison of long-term field-measured and RUSLE-based modelled soil loss in Switzerland, *Geoderma Regional*, 2022, Vol. 31, Article e00595, DOI: 10.1016/j.geodrs.2022.e00595.
5. Durigon V. L., Carvalho D. F., Antunes M. A. H. et al., NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed, *Intern. J. Remote Sensing*, 2014, Vol. 35, Issue 2, pp. 441–453, DOI: 10.1080/01431161.2013.871081.
6. 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, *Science of the Total Environment*, 2017, Vol. 574, pp. 95–108, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.019.
7. Hawker L., Uhe P., Paulo L. et al., A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed, *Environmental Research Letters*, 2022, Vol. 17, No. 2, Article 024016, DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.
8. la Cecilia D., Tom M., Stamm C., Odermatt D., Pixel-based mapping of open field and protected agriculture using constrained Sentinel-2 data, *ISPRS Open J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, Vol. 8, Article 100033, DOI: 10.1016/j.ojphoto.2023.100033.
9. Laflen J. M., Lane L. J., Foster G. R., WEPP: a new generation of erosion prediction technology, *J. Soil and Water Conservation January*, 1991, Vol. 46, No. 1, pp. 34–38.

10. Liu J., Yang K., Tariq A. et al., Interaction of climate, topography and soil properties with cropland and cropping pattern using remote sensing data and machine learning methods, *The Egyptian J. Remote Sensing and Space Sciences*, 2023, Vol. 26, Issue 3, pp. 415–426, DOI: 10.1016/j.ejrs.2023.05.005.
11. Marino S., Understanding the spatio-temporal behavior of crop yield, yield components and weed pressure using time series Sentinel-2-data in an organic farming system, *European J. Agronomy*, 2023, Vol. 145, Article 126785, DOI: 10.1016/j.eja.2023.126785.
12. Moore I. D., Grayson R. B., Ladson A. R., Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications, *Hydrological Processes*, 1991, Vol. 5, Issue 1, pp. 3–30, DOI: 10.1002/HYP.3360050103.
13. Nguyen Q.-V., Liou Y.-A., Nguyen K.-A., Tran D.-P., Enhancing basin sustainability: Integrated RUSLE and SLCC in land use decision-making, *Ecological Indicators*, 2023, Vol. 155, Article 110993, DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110993.
14. Pandey A., Himanshu S. K., Mishra S. K., Singh V. P., Physically based soil erosion and sediment yield models revisited, *CATENA*, 2016, Vol. 147, pp. 595–620, DOI: 10.1016/j.catena.2016.08.002.
15. Petito M., Cantalamessa S., Pagnani G. et al., Impact of Conservation Agriculture on Soil Erosion in the Annual Cropland of the Apulia Region (Southern Italy) Based on the RUSLE-GIS-GEE Framework, *Agronomy*, 2022, Vol. 12, Issue 2, Article 281, DOI: 10.3390/agronomy12020281.
16. Räsänen T. A., Tähtikarhu M., Uusi-Kämpä J. et al., Evaluation of RUSLE and spatial assessment of agricultural soil erosion in Finland, *Geoderma Regional*, 2023, Vol. 32, Article e00610, DOI: 10.1016/j.geodrs.2023.e00610.
17. Renard K. G., Freimund J. R., Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE, *J. Hydrology*, 1994, Vol. 157, Issues 1–4, pp. 287–306, DOI: 10.1016/0022-1694(94)90110-4.
18. Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. et al., *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, U. S. Department of Agriculture, 1997, 404 p.
19. Sharply A. N., Williams J. R., *EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation*, U. S. Department of Agriculture Technical Bulletin, 1990, 235 p.
20. Uuemaa E., Ahi S., Montibeller B. et al., Vertical accuracy of freely available global digital elevation models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM), *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Issue 21, Article 3482, DOI: 10.3390/rs12213482.
21. Wang L., Zhang F., Fu S. et al., Assessment of soil erosion risk and its response to climate change in the mid-Yarlung Tsangpo River region, *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, Vol. 27, Issue 12, pp. 607–621, DOI: 10.1007/s11356-019-06738-y.
22. Wischmeier W. H., Smith D. D., *Predicting rainfall erosion losses: A Guide to Conservation Planning*, U. S. Department of Agriculture, 1978, 67 p.