

УДК 519.876.5:631.45

Кирьянов Александр Александрович

Орешкина Мария Руслановна

Болдырева Леся Михайловна

Студенты кафедры «Гидромелиорации» (Кирьянов, Орешкина)

Доцент, Кандидат технических наук (Болдырева)

*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный
университет имени И. Т. Трубилина», г. Краснодар, Россия*

**ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ КАК
ОСНОВА ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ
ПРОТИВОЭРОЗИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ**

Аннотация.

В статье рассматривается подход к количественной оценке эрозионной опасности агроландшафтов на основе пространственно-распределенного математического моделирования. В качестве вычислительного ядра используется модифицированное уравнение USLE (Universal Soil Loss Equation), интегрированное в среду геоинформационной системы (ГИС). Предложена методика параметризации цифровой модели рельефа (ЦМР) для расчета потенциала смыва почвы. На основе полученных картограмм модуля смыва выполнено зонирование территории по степени эрозионной опасности и обосновано размещение комплекса противоэрозионных мероприятий (агротехнических, лесомелиоративных, гидротехнических). Показано, что применение данного подхода позволяет снизить неопределенность проектных решений и перейти

от «аналогового» проектирования к более обоснованному управлению эрозионными рисками.

Ключевые слова: математическое моделирование, эрозия почв, USLE, ГИС, цифровая модель рельефа, рекультивация земель, противоэрозионные мероприятия.

Введение

1. Актуальность.

Деградация земель в результате водной эрозии остается одним из основных факторов снижения плодородия почв и нарушения устойчивости агроландшафтов, особенно в зонах с пересеченным рельефом. Для техногенно нарушенных территорий (отвалы, карьеры) проблема усугубляется отсутствием сформированного почвенного покрова и высокой уязвимостью к размыву. Традиционные методы проектирования противоэрозионных мероприятий (валов, террас, лесополос) часто базируются на усредненных нормативных показателях и не в полной мере учитывают пространственную неоднородность факторов эрозии: уклонов, длин склонов, типа почв, растительного покрова. В результате эффективность таких решений оказывается ниже ожидаемой, особенно на сложных по рельефу участках.

Цель в данном направлении исследования заключается в разработке и апробировании алгоритмов пространственно-распределенного моделирования потенциального смыва почвы, результаты которого могут служить основой для оптимизации размещения комплекса

противоэрозионных мероприятий. В ходе множественных проведённых исследований в этой области были сформированы следующие задачи, которые обеспечивают выполнение цели:

1. Построить цифровую модель рельефа исследуемого участка и рассчитать производные морфометрические параметры (уклоны, экспозиции, фактор длины склона LS).
2. Сформировать набор растровых слоев факторов эрозии в соответствии с уравнением USLE/RUSLE.
3. Выполнить расчет среднегодовалого смыва почвы с визуализацией на картограмме.
4. Провести классификацию территории по категориям эрозионной опасности.
5. Предложить схему размещения противоэрозионных мероприятий на основе полученных пространственных данных.

2. Объект, исходные данные и математический аппарат

2.1. Объект исследования

В качестве модельного полигона выбран участок сельскохозяйственных земель площадью 12,5 км², расположенный в Кингисеппском районе Ленинградской области. Участок характеризуется склоновым рельефом с перепадами высот от 15 до 45 м, преимущественно дерново-подзолистыми почвами и высокой распаханностью. Выбор объекта обусловлен наличием открытых данных спутниковой съемки и почвенных карт, а также актуальностью вопроса эрозии для Северо-Западного региона.

2.2. Исходные данные

Для реализации моделирования использованы три типа данных (табл. 1).

Таблица 1 — Структура исходных данных для моделирования

Тип данных	Источник	Формат	Использование
Цифровая модель рельефа (ЦМР)	Спутниковая съемка ASTER GDEM (разрешение 30 м)	Растр (GeoTIFF)	Расчет уклонов, длины склонов, аккумуляции стока
Почвенная карта	Почвенная карта Ленинградской области (ведомственные фонды)	Вектор (SHP)	Определение эродированности почв (К-фактор)
Данные о землепользовании	Спутниковые снимки Sentinel-2 за 2023–2024 гг.	Растр классификации	Определение фактора растительного покрова (С)

2.3. Математический аппарат: модифицированное уравнение USLE

В основе модели лежит уравнение Universal Soil Loss Equation (USLE), адаптированное для работы в растровой среде:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

где:

- A — среднемноголетняя потеря почвы от водной эрозии, т/(га·год);
- R — фактор эрозионной способности осадков (дождевой эрозионный индекс). Для Ленинградской области принято зональное значение $R = 80$ согласно климатическим справочникам;
- K — фактор эродруемости почвы. Определяется по гранулометрическому составу и содержанию органического вещества, значения присвоены на основе почвенной карты;
- LS — топографический фактор (отношение смыва на данном склоне к смыву на стандартном склоне длиной 22,13 м и уклоном 9%). Расчет выполнен по алгоритму Desmet & Govers (1996):

$$LS = \frac{(m + 1) \cdot \left(\frac{FlowAcc}{22.13}\right)^m \cdot \left(\frac{\sin \theta}{0.09}\right)^n}{x^m}$$

где $FlowAcc$ — аккумулярованный сток (площадь водосбора на ячейку раstra), θ — уклон в радианах, $m = 0,4$, $n = 1,3$ (коэффициенты для преобладающей плоскостной эрозии);

- C — фактор растительного покрова (безразмерный). Рассчитан на основе среднего NDVI за вегетационный период 2024 г. с использованием эмпирической зависимости $C = e^{-2.2 \cdot NDVI}$;

- P — фактор эффективности противоэрозионных мероприятий. Для сценария существующего состояния принят равным 1 (мероприятия не учитываются).

3. Методика пространственно-распределенного моделирования

В качестве примера одного из методов было рассмотрено моделирование в среде QGIS 3.34 с использованием инструментов растровой алгебры и модуля SAGA GIS для гидрологического анализа.

QGIS — это бесплатная геоинформационная система (ГИС), аналог платного ArcGIS. Она позволяет работать с пространственными данными: картами, спутниковыми снимками, цифровыми моделями рельефа.

3.34 — конкретная версия программы (на момент написания статьи актуальная).

«В среде» означает, что все действия (загрузка данных, расчеты, визуализация) выполнялись внутри этой программы, а не с помощью отдельного скрипта на Python или другой программы.

Растр — это изображение, состоящее из пикселей (ячеек). В ГИС растрами обычно представляют:

- цифровые модели рельефа (высота в каждой ячейке),
- уклоны,
- спутниковые снимки.

Растровая алгебра — это способ выполнения математических операций с растрами. Например, формула USLE:

$$A = R \times K \times LS \times C \times PA = R \times K \times LS \times C \times P$$

означает, что программа берет пять растров (каждый со своим значением в каждой ячейке) и перемножает их значения ячейка за ячейкой, создавая новый растр — итоговую карту смыва.

В QGIS для этого используется инструмент Raster Calculator (калькулятор растров), куда вводится формула.

SAGA GIS — это отдельная программа с открытым кодом, специализирующаяся на геообработке. В QGIS она интегрирована как набор инструментов (модуль), то есть ею можно пользоваться, не выходя из QGIS.

Гидрологический анализ в данном контексте — это расчет характеристик поверхностного стока по цифровой модели рельефа. В статье использовались следующие операции:

Операция	Что делает
Fill Sinks (заполнение депрессий)	Устраняет ложные понижения в рельефе, чтобы вода могла «течь» корректно

Операция	Что делает
Flow Accumulation (аккумулятивный сток)	Рассчитывает, сколько ячеек сверху стекает в каждую конкретную ячейку (площадь водосбора на пиксель)
Flow Direction (направление стока)	Определяет, в какую сторону движется вода из каждой ячейки (метод D8 — одно из восьми направлений)

Эти расчеты нужны для вычисления LS-фактора по формуле Desmet & Govers, которая зависит не только от уклона, но и от площади водосбора (аккумулятивного стока) для каждой ячейки.

Теперь же рассмотрим QGIS 3.34 с SAGA GIS непосредственно в теории:

Шаг 1. Подготовка ЦМР.

Исходный растр высот подвергнут фильтрации (удаление артефактов) и заполнению депрессий (Fill Sinks) для формирования гидрологически корректной модели.

Шаг 2. Расчет фактора *LS*.

Последовательность действий:

- Расчет уклона (*Slope*) в градусах и радианах.
- Расчет аккумулятивного стока (*Flow Accumulation*) методом многоканального направления (D8).

- Применение формулы Desmet & Govers к растру уклона и аккумуляции стока.

Шаг 3. Формирование растровых слоев *R*, *K*, *C*, *P*.

- *R*: создан константный растр с зональным значением 80.
- *K*: почвенная карта конвертирована в растр с присвоением значений эродруемости (от 0,15 до 0,35) для каждого типа почвы.
- *C*: вычислен средний NDVI за апрель–сентябрь 2024 г. по снимкам Sentinel-2, выполнена маска пашни и лесных массивов.
- *P*: для сценария «существующее состояние» использован растр со значением 1.

Шаг 4. Интегральная оценка.

Выполнено поэлементное перемножение пяти растров в калькуляторе формул. На выходе получена картограмма модуля смыва почвы (т/га/год).

Шаг 5. Классификация эрозионной опасности.

На основе методических рекомендаций Минсельхоза РФ территория разделена на категории:

- менее 0,5 т/(га·год) — неэрозионноопасные;
- 0,5–2,0 т/(га·год) — слабоэрозионноопасные;
- 2,0–5,0 т/(га·год) — среднеэрозионноопасные;
- более 5,0 т/(га·год) — сильноэрозионноопасные.

4. Результаты моделирования и их интерпретация для планирования мероприятий

4.1. Картограмма эрозионной опасности

В результате моделирования получена растровая модель распределения смыва. Анализ показал:

- На выположенных участках (уклон $< 1,5^\circ$) смыв не превышает 0,3 т/(га·год).
- На склонах крутизной 3–5° и протяженностью более 300 м значения смыва достигают 3–7 т/(га·год) (средняя и сильная степень).
- В зонах аккумуляции стока (ложбины, тальвеги) расчетный смыв достигает 12 т/(га·год), что требует гидротехнической защиты.

4.2. Обоснование размещения противоэрозионных мероприятий

Полученные пространственные данные позволили перейти от шаблонного размещения сооружений к дифференцированному зонированию (табл. 2).

Таблица 2 — Рекомендуемые мероприятия в зависимости от класса эрозионной опасности**

Класс опасности	Модуль смыва, т/(га·год)	Рекомендуемые мероприятия	Пространственная привязка
Слабая	0,5–2,0	Агротехнические: поперечное боронование, буферные полосы многолетних трав	По границам полей, нижней трети склона, вдоль

Класс опасности	Модуль смыва, т/(га·год)	Рекомендуемые мероприятия	Пространственная привязка
Средняя	2,0–5,0	Лесомелиорация: полевые защитные лесополосы с водорегулирующей функцией	Линии по горизонталям (поперек основного стока) с шагом 200–300 м
Сильная	>5,0	Гидротехнические: водоотводящие валы, террасирование	В местах концентрации стока (талвеги) и на крутых склонах >5°

Изменяя факторы P и C , выполнена оценка эффективности планируемых мероприятий. При размещении лесополос и переводе наиболее эродлируемых участков пашни в залежь моделирование показывает снижение смыва на 65–80%, что согласуется с литературными данными. Однако окончательная верификация расчетов требует постановки натурных наблюдений (створные площадки, метки), что планируется в рамках дальнейших исследований.

Заключение

Применение пространственно-распределенного моделирования на основе уравнения USLE в среде ГИС позволяет объективно картировать эрозионные процессы с дискретностью, достаточной для принятия проектных решений. Предложенный алгоритм параметризации факторов *LS* через аккумулярованный сток, *S* через NDVI обеспечивает воспроизводимость результатов при относительно низких затратах на полевые изыскания. Интеграция результатов моделирования в ГИС-проект позволяет автоматизировать процесс размещения противоэрозионных мероприятий, рассчитывать их площадь, объемы земляных работ и предварительно оценивать эколого-экономическую эффективность. Данный подход может быть рекомендован для использования в схемах землеустройства, проектах рекультивации нарушенных земель, а также в системах точного земледелия.

Список литературы

1. Висхуженко, А.С. Математическое моделирование эрозионных процессов / А.С. Висхуженко, В.Н. Широков. — СПб.: Наука, 2018. — 210 с.
2. Renard, K.G. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) / K.G. Renard, G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, D.C. Yoder // USDA Agricultural Handbook No. 703. — 1997. — 404 p.
3. Desmet, P.J.J. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units / P.J.J. Desmet, G. Govers // Journal of Soil and Water Conservation. — 1996. — Vol. 51, No. 5. — P. 427–433.

4. Методические указания по оценке интенсивности эрозии почв для целей сельскохозяйственного производства / Минсельхоз РФ. — М., 2020.