

Мудрых Н.М., Самофалова И.А., Чашин А.Н.

Прогнозирование эрозионных потерь почвы с использованием модели RUSLE

Электронный научно-производственный журнал

«АгроЭкоИнфо»

УДК 631.48

## Прогнозирование эрозионных потерь почвы с использованием модели RUSLE

*Мудрых Н.М., Самофалова И.А., Чашин А.Н.*

*Пермский государственный аграрно-технологический университет*

### Аннотация

*Проведены исследования по определению потенциального смыва почв в условиях эрозионно-аккумулятивного рельефа Предуралья. Масштаб исследований – детальный и охватывает участок поля площадью в 11 га, расположенный в Чердынском районе Пермского края. Исследования включали натурные обследования и дистанционные методы. Для оценки рельефа была использована глобальная цифровая модель рельефа. Поскольку значение широты местности – N 60.4, была выбрана открытая модель Японского аэрокосмического агентства JAXA– ALOS30 (пространственное разрешение 30 м). Влияние водной эрозии на растительный покров оценивалось через вегетационный индекс NDVI, вычисленный по серии одновременных снимков Sentinel. Оценка эрозионной опасности ключевого участка проведена по модели универсального уравнения потери почв – RUSLE (уравнение Уишмейера-Смита), разработанной в США. В условиях детального масштаба 3 переменных модели являются постоянными (R, C, P), и 2 имеют пространственную неоднородность (K, LS). Модель реализована в калькуляторе растров QGIS и отражает пространственную неоднородность потенциального смыва почвы. Установлены структурные связи почвенного, растительного покрова и рельефа. Максимальный потенциальный смыв по уравнению RUSLE отмечается ниже перегиба склона в контуре дерново-карбонатной почвы.*

**Ключевые слова:** МОДЕЛЬ RUSLE, ЦМР ALOS30, ЭРОЗИЯ ПОЧВЫ, NDVI, ПЕРМСКИЙ КРАЙ

### Введение

Особенность современных исследований заключается в преобладании системного, обще-экологического подхода. Перспективным направлением является интеграция космического мониторинга и пространственного анализа в ГИС для создания различных

Мудрых Н.М., Самофалова И.А., Чашин А.Н.

Прогнозирование эрозионных потерь почвы с использованием модели RUSLE

Электронный научно-производственный журнал

«АгроЭкоИнфо»

моделей [1, 2, 3]. ГИС позволяют строить и использовать цифровые модели рельефа и пространственные модели местности для изучения экосистем [4]. Исследования данных с помощью ГИС позволяют установить иерархию биоценотических связей, которые необходимо знать для разработки прогностических моделей [5, 6]. Кроме того, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия на сельскохозяйственных угодьях также должно проводиться с применением геоинформационных технологий и методов анализа пространственных данных, важным этапом которых является агроэкологическая оценка земель [7, 8, 9, 10].

Агроэкологическая оценка земель предполагает детальное и комплексное изучение природных условий территории. Значимыми параметрами оценки являются морфометрические показатели рельефа, так как от него зависят условия территории, стоки, эрозия почв. Развитие эрозионных процессов в любом регионе неразрывно связано с сельскохозяйственной деятельностью. В условиях гумидного климата выделение ареалов водной эрозии, в особенности линейных форм, возможно и по состоянию растительности. Решить проблему защиты почв от эрозии можно путем комплексного учета совокупного влияния природных и антропогенных факторов [7, 11, 12].

Однако в условиях сложного рельефа Среднего Предуралья на процессы смыва почвы будет влиять и пестрота почвообразующих пород, приводящая к существенному разнообразию почв и их устойчивости к водной эрозии на эрозионно-опасных территориях [12].

Развитие геоинформационных технологий упрощает получение массового количества материала по рельефу и позволяет представлять его в виде тематических карт. Цифровое описание облегчает идентификацию необходимых параметров для агроэкологической оценки. Для пространственной оценки эрозии почв эффективно применять данные дистанционного зондирования (ДДЗ), которые позволяют выполнить моделирование эрозионных потерь почвы [13, 14].

**Цель исследования** – определить потенциальный смыв почв в условиях эрозионно-аккумулятивного рельефа Предуралья.

#### **Методы и объекты исследований**

Исследования проведены в Пермском крае в Чердынском районе на территории

ООО «Чердынское 2». В физико-географическом отношении территория расположена на Соликамской аккумулятивной равнине, которая является частью Русской равнины [15]. Почвообразующими породами являются водно-ледниковые отложения, подстилаемые покровными суглинками, ниже которых залегают пермские мергелистые глины, мергели и известняки. На возвышенностях мощность отложений незначительна (20-50 см), в пониженных элементах рельефа достигает нескольких метров. Местами под песчаными породами наблюдается неглубокое залегание карбонатных пород. Сельскохозяйственные угодья характеризуются мелкоконтурностью, расчлененностью, овражно-балочной сетью и долинами рек.

Объектом исследований является почвенный покров ключевого участка, который исследовали в июне 2017 года – поле (залежь) площадью 10,9 га (рис. 1).

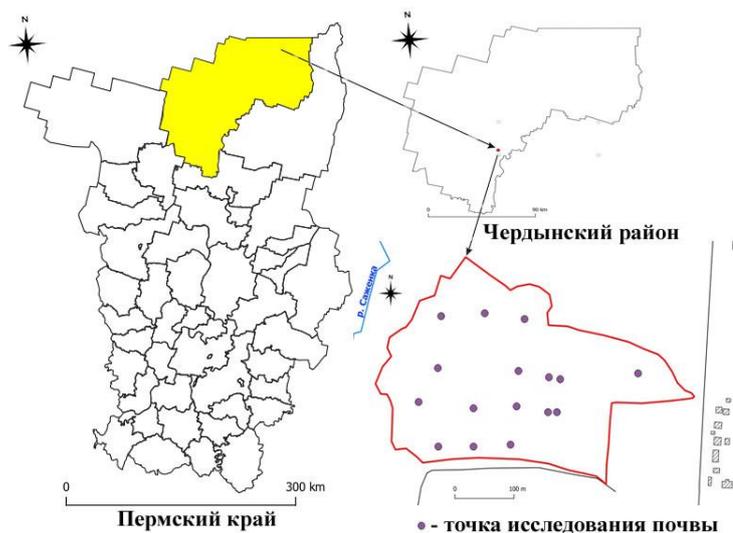


Рис. 1. Местоположение объекта исследований

Полевые исследования включали закладку почвенных разрезов на разных элементах рельефа и отбор индивидуальных почвенных образцов (16 точек) из слоя 0-10 см. Почвы диагностированы в соответствии с классификацией 1977 года [16].

Выбор мест закладки разрезов в пределах поля основан на неоднородности спектральной отражающей способности почв с целью охарактеризовать основные типы почв участка и выполнить почвенную картосхему в детальном масштабе. Выделение классов спектральной отражательной способности открытой поверхности почвы выполнено на основе спутникового снимка Sentinel 2 (дата съемки 02.05.2017) по итерационной самоорганизующейся методике анализа данных – ISODATA (рис. 2). На

Мудрых Н.М., Самофалова И.А., Чашин А.Н.

Прогнозирование эрозионных потерь почвы с использованием модели RUSLE

Электронный научно-производственный журнал

«АгроЭкоИнфо»

полученных в результате ISODATA-классификации контурах были расставлены и определены на местности точки, загруженные в GPS-навигатор.

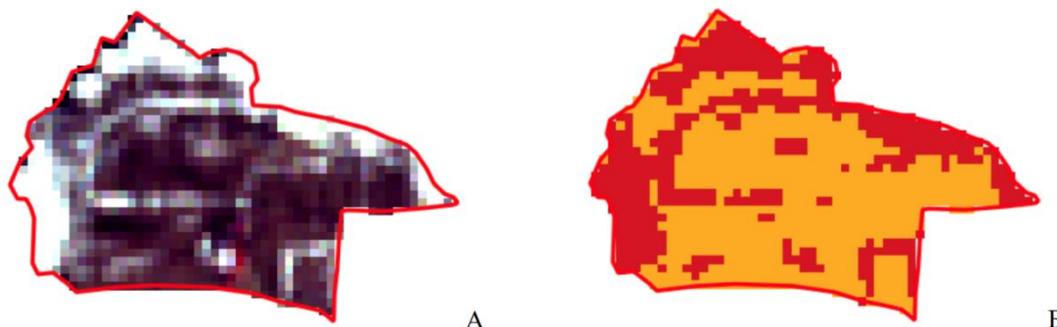


Рис. 2. Этапы обработки спутникового снимка.  
А – маска открытой поверхности почвы участка;  
Б – результат классификации маски снимка

Рельеф ключевого участка характеризуется неоднородностью в пределах поля (рис. 3) и представляет склон западной экспозиции протяженностью в 512 м, перепад высот – от 142 до 176 м (в границах поля), крутизна поверхности варьирует от 0,9 до 11 градусов. Склон – рассеивающий сложной формы, где выположенные участки в верхней части склона чередуются с выпуклыми (в средней части склона) и вогнутыми (в нижней части), переходящими далее в пойму реки Саженка.

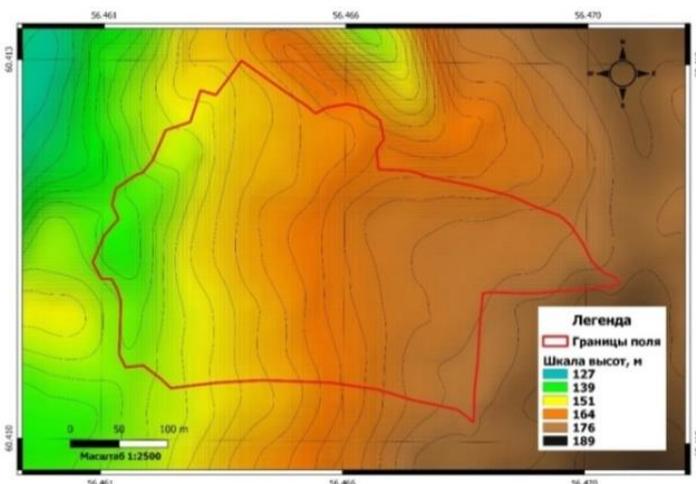


Рис. 3. Рельеф участка по данным ЦМР ALOS 30

Состояние растительности определено по данным дистанционного зондирования с помощью вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) по формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

где: NIR – отражение в ближнем инфракрасном канале снимка; RED – отражение в красном канале снимка [17].

Рассчитанные в работе значения NDVI интерпретировали в соответствии со шкалой для сельскохозяйственных культур Пермского края [18]. Градации составляют легенду карт индекса NDVI. Используемые для вычисления NDVI данные Sentinel 2 (июль 2016, июль 2017 года) имеют пространственное разрешение в 10 м, которое недостаточно для создания качественного покрытия на участки общей площадью в 10,9 га, поэтому выполнено повышение разрешения вычисленных NDVI-растров до 1 м методом сплайн-интерполяции.

Для оценки рельефа была использована глобальная цифровая модель рельефа. Поскольку покрытие SRTM не охватывает данный участок (значение широты местности N 60.4), была выбрана открытая модель Японского аэрокосмического агентства JAXA-ALOS30 (пространственное разрешение 30 м). При обработке ЦМР было увеличено пространственное разрешение раstra до 1 м методом сплайн-интерполяции (аналогично NDVI-данным). Методы обработки рельефа включали расчет морфометрических параметров (крутизна и экспозиция склонов) и трехмерную визуализацию. В оформлении картограммы крутизны склонов использовали переклассификацию растров. Обработка данных дистанционного зондирования и оформление картографических материалов выполнены в ГИС-приложении QGIS (версия 3.4.3). Подбор фоновой окраски для почвенной карты выполнен по условным обозначениям для крупномасштабных почвенных карт [19].

Лабораторные исследования почвенных проб включали определение содержания гумуса (ГОСТ 26213-84), реакции среды (ГОСТ 26483-85) и суммы поглощённых оснований.

Оценка эрозионной опасности ключевого участка проведена по модели универсального уравнения потери почв – RUSLE (уравнение Уишмейера-Смита), разработанной в США [20]. Модель представляет произведение факторов эрозии и имеет вид:

$$Q = 0,224 \times R \times K \times LS \times C \times P, \quad (2)$$

где  $Q$  – потеря почвы от эрозии в  $\text{кг}/\text{м}^2$  за год;  $R$  – комплексная характеристика эродирующей способности дождя;  $K$  – комплексная характеристика свойств почвы, определяющих ее эрозионные свойства (водопроницаемость и противоэрозионная стойкость);  $LS$  ( $LS$ -factor) – длина склона и коэффициент крутизны;  $C$  – комплексная характеристика влияния системы земледелия на смыв почвы;  $P$  – комплексная характеристика эффективности различных противоэрозионных мероприятий.

### Результаты и их обсуждение

Статистическая обработка результатов проведена в программе MS Excel. В результате обработки цифровой модели рельефа был создан векторный слой диапазонов углов наклона (рис. 4А), и в результате установлена преобладающая крутизна  $5-8^\circ$  (5 га). Это составляет почти половину площади изучаемой территории, где возможно формирование почв со средней и сильной смывистостью.

В результате полевых и лабораторных исследований почв на предварительной контурной основе почвенной карты выделены почвы: дерново-слабоподзолистая ( $\text{Пд}_1$ ) и дерново-карбонатная типичная ( $\text{Дк}_1$ ). При этом дерново-подзолистые почвы обнаружены на вершине склона и в его верхней части, а дерново-карбонатные – в средней части склона, где крутизна наиболее значительна. Данную закономерность демонстрирует трехмерная карта рельефа с отмеченными на ней точками (рис. 4 Б).

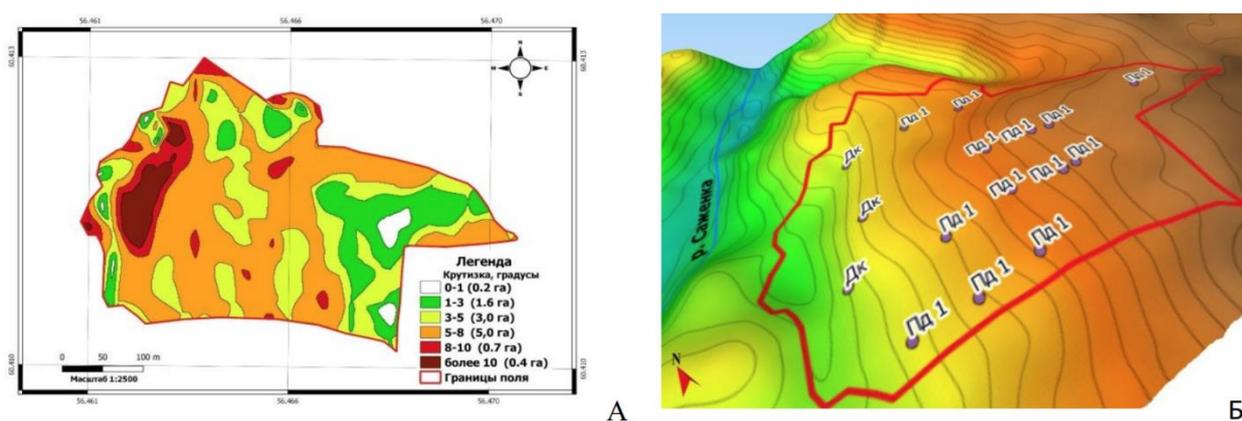


Рис. 4. Геоморфологические условия расположения выявленных почв

А – крутизна склонов на ключевом участке;

Б – расположение точек отбора проб на ключевом участке

В средней части склона отмечается перегиб и смена формы склона с выпуклой на вогнутую, и далее более выположенный участок переходит в пойму. Именно на перегибе

склона диагностирована дерново-карбонатная типичная почва, где отмечается близкое залегание (с 28-32 см) плотных известковых пород. Таким образом, можно предположить, что на крутых участках склона в результате эрозии произошел смыв легкоразмываемых покровных отложений до подстилающей плотной известковой породы.

На ключевом участке (рис. 5) преобладает дерново-слабоподзолистая почва (74%), а дерново-карбонатная занимает всего 2,8 га (26%). Контур дерново-карбонатной почвы имеет подковообразную форму, которая помогает выявить участки с максимальным проявлением эрозии, а также с аккумуляцией (у подножия склона, где обнаруживаются выходы элювия подстилающих карбонатных пород).

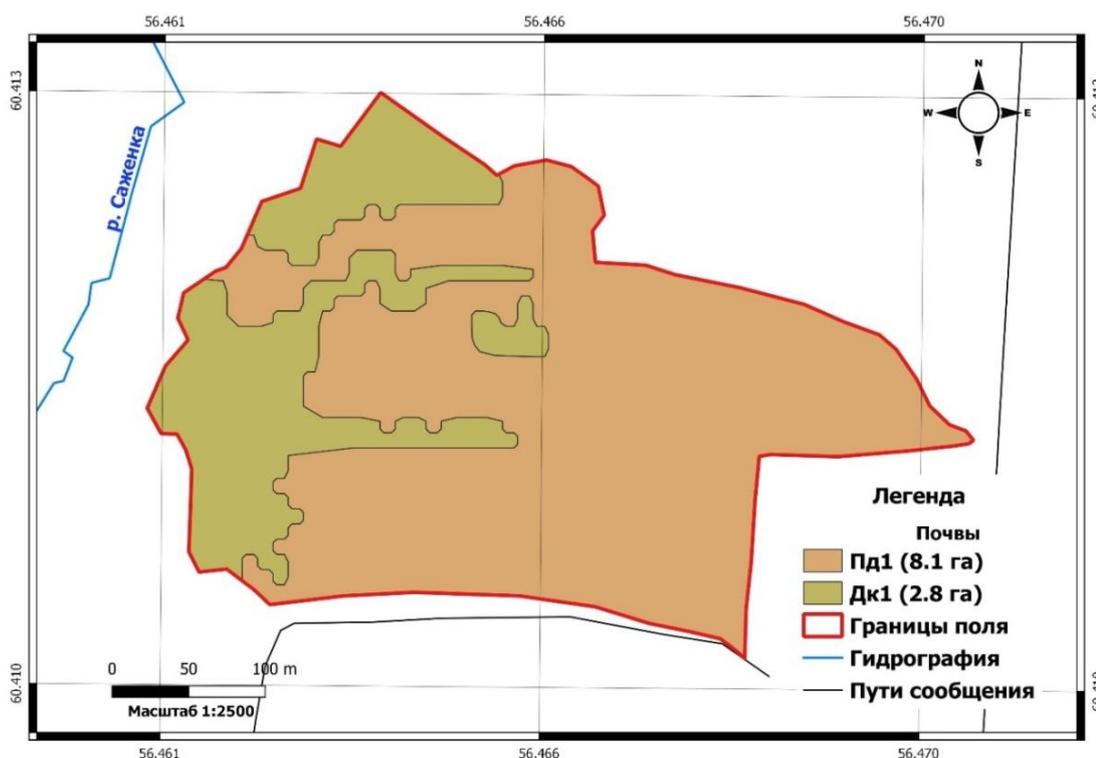


Рис. 5. Картосхема почвенного покрова ключевого участка

Оценка растительного покрова ключевого участка по NDVI показала преобладание растений с хорошим и очень хорошим состоянием. На картограммах NDVI отражена динамика проективного покрытия растениями с 2016 по 2017 годы (рис. 6). Выбор данного периода обусловлен сроками проведения полевых исследований и наличием безоблачных снимков Sentinel 2. Ареал угнетения растений в южной части ключевого участка не меняется во времени и соответствует уклону в 3-5° площадью 0,4 га.

Мудрых Н.М., Самофалова И.А., Чашин А.Н.

Прогнозирование эрозионных потерь почвы с использованием модели RUSLE

Электронный научно-производственный журнал

«АгроЭкоИнфо»

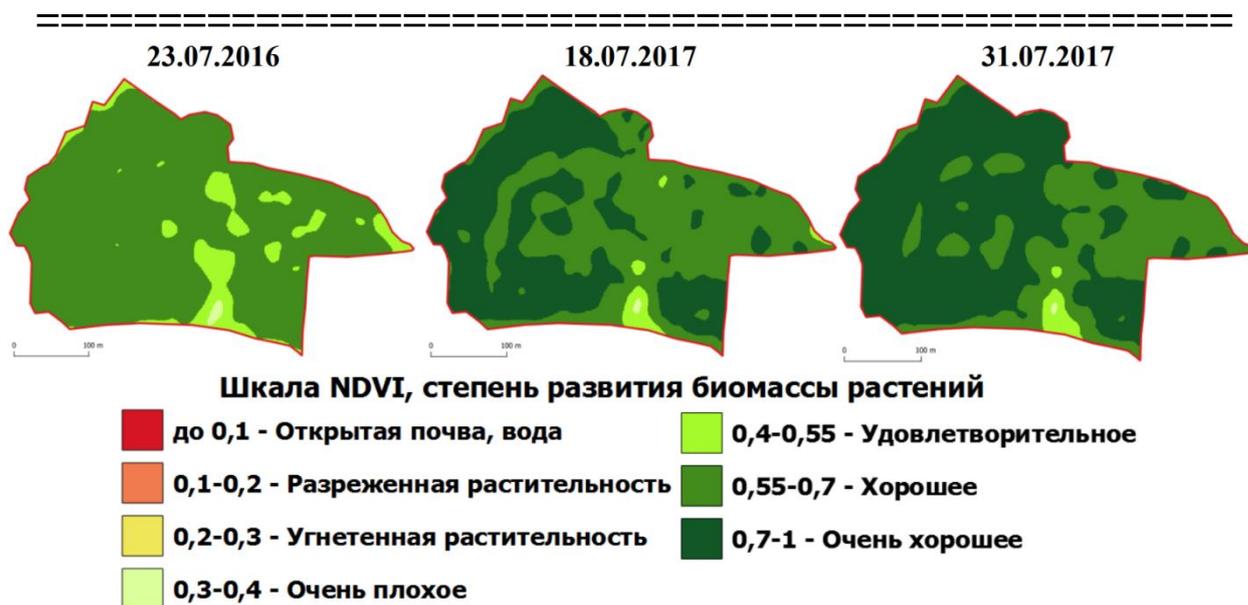


Рис. 6. Картограммы динамики индекса растительности NDVI в июле

Установлены структурные связи свойств в почвах (табл. 1). Тип почвы в значительной степени связан с углом наклона поверхности, что подтверждает предыдущие высказывания о формировании разных типов почв на такой небольшой территории.

Таблица 1. Корреляционная матрица (n = 16)

Показатель	Тип почвы	Угол наклона	Гумус	pH	S	NDVI
Тип почвы	1,00	0,66**	0,52**	0,70***	0,68***	0,54**
Угол наклона		1,00	0,56**	0,52**	0,36*	0,29*
Гумус			1,00	0,78	0,76	0,20*
pH				1,00	0,83	0,52**
S					1,00	0,30*
NDVI						1,00

Примечание: \* – достоверно при  $P = 0,95$ ; \*\* – достоверно при  $P = 0,99$ ; \*\*\* – достоверно при  $P = 0,999$

Тип почвы, угол наклона и индекс NDVI достоверно связаны с изменением свойств почв, но с разной степенью тесноты. От изменения угла наклона в большей степени зависят содержание гумуса и pH, в меньшей – содержание обменных оснований и NDVI. Основными факторами (лимитирующими состояние растений) по NDVI являются тип почвы и реакция среды.

Влияние крутизны склона на изменение показателей свойств почв является нехарактерным для эродированных земель: с увеличением угла наклона уменьшается

Мудрых Н.М., Самофалова И.А., Чашин А.Н.

Прогнозирование эрозионных потерь почвы с использованием модели RUSLE

Электронный научно-производственный журнал

«АгроЭкоИнфо»

кислотность и увеличивается содержание гумуса. Это объясняется, тем, что крутизна как фактор эрозии повлияла на условия почвообразования: почвы легкого гранулометрического состава на легкоразмываемых породах на крутых частях склона оказались смыты, что привело к обнажению элювия известняков, и сформировались более плодородные дерново-карбонатные типичные почвы в нехарактерной для них нижней части склона.

При моделировании смыва почвы по модели Уишмейера-Смита был проведен подбор исходных параметров. Фактор комплексной характеристики эродирующей способности дождя (R) одинаков на всей площади поля. R рассчитан по многолетним данным метеостанции г. Чердынь. Средний многолетний  $R = 4,8$  [21]. Фактор эродируемости почвы (K) определен приближенно (т.к. отсутствуют дополнительные данные о структуре и водопроницаемости почвы, используемые при определении по нонограмме) по данным гранулометрического состава и содержанию гумуса в почве. Значения K-фактора определяли для каждой точки по таблице «Комплексная характеристика противоэрозионной стойкости почв» [22]. Для реализации данного фактора в модели RUSLE создана интерполированная поверхность по точкам исследования. Интерполяция выполнена методом Обычный кригинг (рис. 7). Коэффициент наклона по длине и крутизне (LS-factor) является вторым входным слоем при расчете модели универсального уравнения потери почвы на основе цифровой модели рельефа ALOS 30 модулем SAGA Basic terrain analysis программы QGIS (рис. 7).

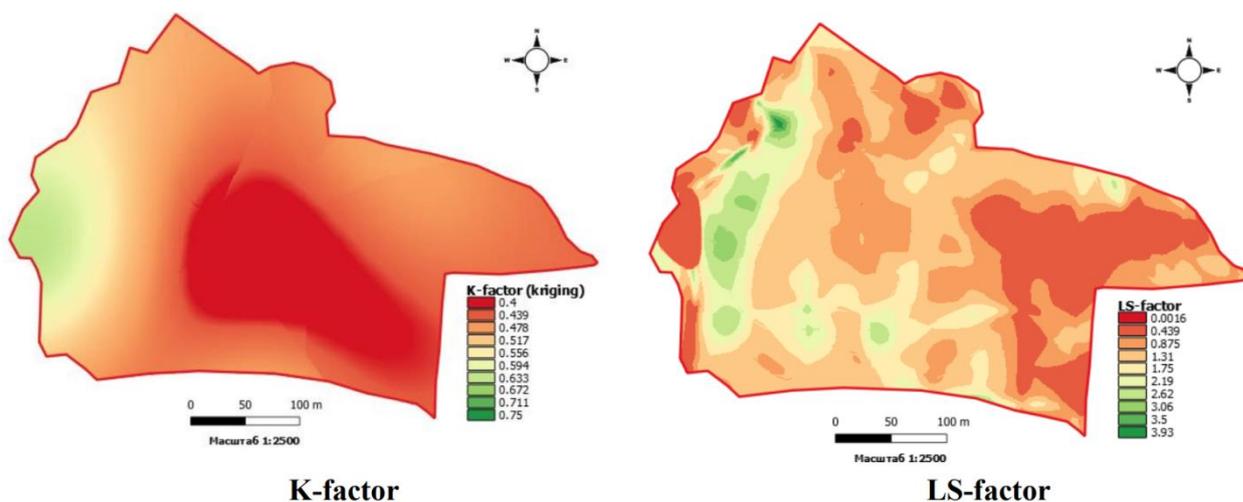


Рис. 7. Исходные геостатистические слои модели RUSLE

Фактор севооборота (C) определен по [21] с учетом произрастающей

Мудрых Н.М., Самофалова И.А., Чашин А.Н.

Прогнозирование эрозионных потерь почвы с использованием модели RUSLE

Электронный научно-производственный журнал

«АгроЭкоИнфо»

растительности. До перехода в залежное состояние на поле выращивался картофель, поэтому  $C = 0,75$ . Фактор почвозащитных мероприятий ( $P$ ) зависит от применяемых на поле противоэрозионных мероприятий и крутизны склона. Поскольку на данном участке агротехнические меры по защите почв от эрозии не проводятся, то  $P = 1$ .

Таким образом, модель состоит из 3 переменных, одинаковых на всей площади поля ( $R$ ,  $C$ ,  $P$ ), и двух геостатистических слоев ( $K$  и  $LS$ ). Очевидно, что параметры  $R$ ,  $C$  и  $P$  будут одинаковы в детальном масштабе выполненных исследований. Решение модели выполнено в калькуляторе растров QGIS. Полученный растр потенциального смыва классифицирован на классы эрозионной опасности: I класс – смыв от 0 до 2,5 т/га, II класс – смыв от 2,5 до 5, III класс – смыв от 5 до 10 т/га (рис. 8).

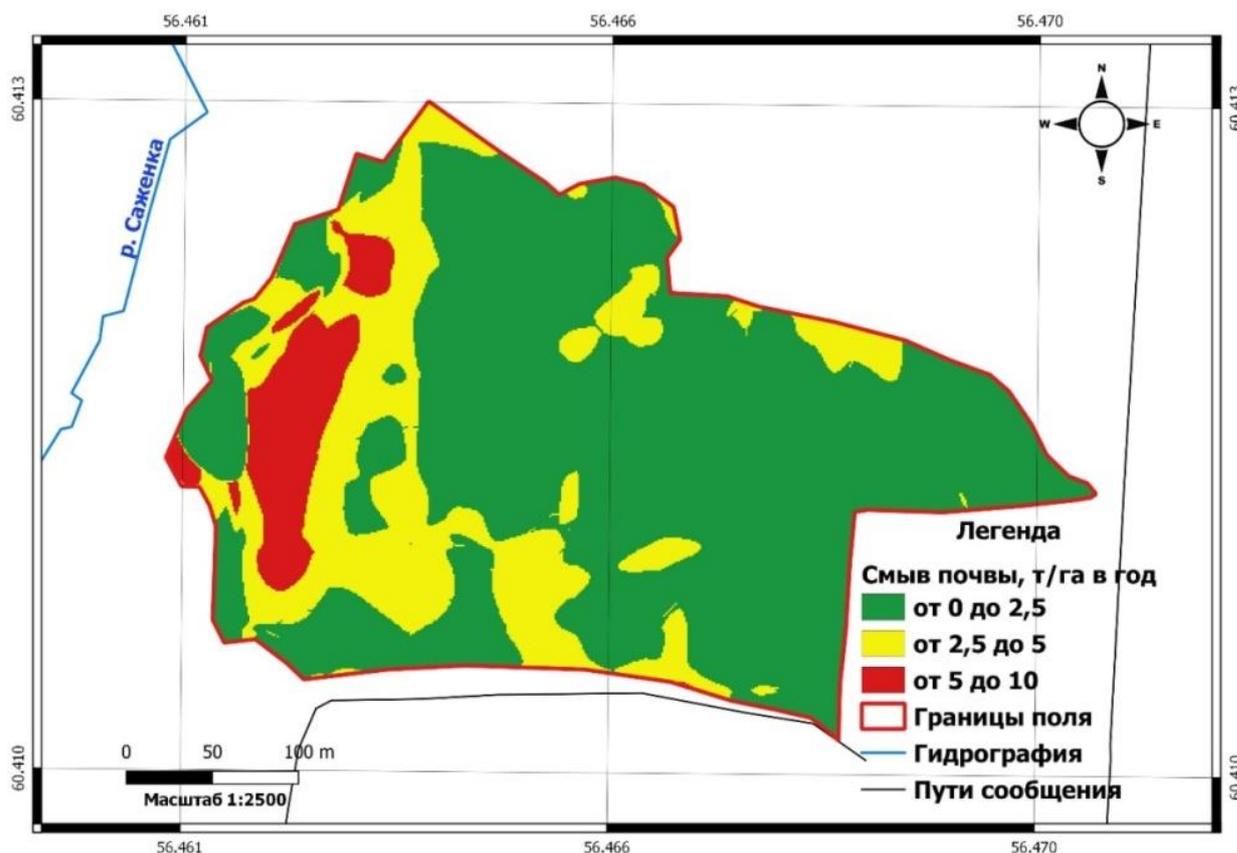


Рис. 8. Карта потенциального смыва почвы по модели RUSLE

Итак, на поле площадью 10,9 га 30% территории подвержено слабой и умеренной эрозионной опасности (табл. 2). Максимальный потенциальный смыв приурочен и соотносится с контуром дерново-карбонатной почвы, которая сформировалась на более крутом участке и, соответственно, потенциально более всего подвержена эрозионным

процессам и смыву.

Таблица 2. Результаты расчета потенциального смыва почвы по модели RUSLE

Потенциальный смыв, т/га в год	Эрозионная опасность	Площадь	
		га	%
0-2,5	Незначительная	7,65	70
2,5-5,0	Слабая	2,53	23
5,0-10,0	Умеренная	0,74	7

### Выводы

Неоднородность почвенного покрова поля обусловлена перемещением почвенного материала под действием эрозионных процессов. В результате на наиболее эрозионно-опасной части поля сформировались дерново-карбонатные типичные почвы, которые более устойчивы к эрозии (в сравнении с дерново-подзолистыми). Таким образом, выход на поверхность карбонатных пород приводит к дифференциации свойств почвенного покрова на изучаемом ключевом участке.

Состояние растений лимитируется свойствами почв, в первую очередь, реакцией среды. Изменение геоморфологических условий в пределах поля не оказывает влияния на растительный покров. Незначительное угнетение (выражающееся в удовлетворительном состоянии) растительного покрова отмечается в контуре дерново-подзолистой почвы и связано со свойствами самой почвы: очень низкое содержание гумуса, наличие кислотности.

Максимальный потенциальный смыв по уравнению модели RUSLE отмечается ниже перегиба в контуре дерново-карбонатной почвы, которая характеризуется небольшой мощностью (20-30 см) и значительной каменистостью. Агроэкологическая оценка земель показала, что в пределах поля имеются участки разной устойчивости к водной эрозии и, соответственно, потенциальному смыву почв в условиях эрозионно-аккумулятивного рельефа. Данное обстоятельство необходимо учитывать при использовании территории в качестве сельскохозяйственных угодий, а также при разработке мероприятий по рациональному использованию почв.

### Список использованных источников

1. Копылов И.С., Лунев Б.С., Наумова О.Б., Маклашин А.В. Геоморфологические ландшафты как основа геоэкологического районирования // Фундаментальные

исследования. – 2014. – № 11-10. – С. 2196-2201.

2. Пьянков С.В., Березина О.А., Абдуллин Р.К., Тарасов А.В. Геоэкологическая ГИС ликвидированного Кизеловского угольного бассейна: информационное наполнение и функциональные возможности // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. – М.: Издательство МГУ. – 2019. – Т. 25. – Ч. 1. – С. 308-319.

3. Mudrykh N.M., Samofalova I.A. Models forecasting the content of humus on the basis of structural bonds of properties in soils of light texture. // International Journal of Advanced Science and Technology. – 2020. – 29(9s). – P. 1217-1230.

4. Калюжная И.Ю., Калюжная Н.С., Леумменс Х.Дж.Л. Опыт использования картографических методов и ГИС в проектировании биосферного резервата «Эльтонский» // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. – М.: МГУ. – 2019. – Т. 25. – Ч. 1. – С. 337-351.

5. Смирнова Л.Г., Нарожняя А.Г., Кожушков А.А. Типизация бассейнов Белгородской области по морфометрическим характеристикам рельефа для оценки эрозионной опасности на региональном уровне // Достижения науки и техники АПК. – 2015. – Т. 29. – № 12. – С. 66-69.

6. Черкасов А.А., Махмудов Р.К., Эшроков В.М. ГИС Схема территориального планирования Республики Калмыкия // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. – М.: Издательство МГУ. – 2019. – Т. 25. – Ч. 1. – С. 179-188.

7. Долганова М.В. Повышение эрозионной устойчивости почв агроландшафтов Брянской области фитомелиоративными мероприятиями // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – 2016. – №1. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/01/pdf/11.pdf>.

8. Кирюшин В.И. Адаптивно-ландшафтные системы земледелия – основа современной агротехнологической политики России // Земледелие. – 2000. – № 3. – С. 4-6.

9. Кирюшин В.И. Задачи научно-инновационного обеспечения земледелия России // Земледелие. – 2018. – № 3. – С. 3-8.

10. Мудрых Н.М., Самофалова И.А. Моделирование пространственной изменчивости агрохимических показателей почв в агроландшафтах Нечерноземья // Агрохимический вестник. – 2019. – № 5. – С. 17.-24.

11. Литвин Л.Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. – М.: ИКЦ «Академкнига». – 2002. – 225 с.

12. Самофалова И.А. Диагностика эродированности почв с использованием современных подходов к интерпретации параметров гранулометрического состава // Земледелие. – 2020. – № 1. – С. 14-19.

13. Козлов Д.Н., Жидкин А.П., Лозбенев Н.И. Цифровое картографирование эрозионных структур почвенного покрова на основе имитационной модели смыва

Мудрых Н.М., Самофалова И.А., Чашин А.Н.

Прогнозирование эрозионных потерь почвы с использованием модели RUSLE

Электронный научно-производственный журнал

«АгроЭкоИнфо»

(северная лесостепь Среднерусской возвышенности) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2019. – Вып. 100. – С. 5-35.

14. Papaniordanidis S., Gitas I.Z., Katagis T. Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in Google Earth Engine (GEE) cloud-based platform // Dokuchaev Soil Bulletin. – 2019. – Vol. 100. – P. 36-52.

15. Максимович Г.А. Геоморфологическая карта Пермской области // Информ. Листок. ЦНТИ. – Пермь. – 1979. – № 179.

16. Классификация и диагностика почв СССР. – М.: Колос. – 1977. – 221 с.

17. Черепанов А.С. Вегетационные индексы // Геоматика. – 2011. – №2. – С. 98-102.

18. Пьянков С.В., Калинин Н.А., Связов Е.М., Смирнова А.А., Некрасов И.Б. Мониторинг состояния сельскохозяйственных культур в Пермском крае по данным дистанционного зондирования земли // Вестник Пермского университета. Серия Биология. – 2009. – Вып. 10 (36). – С. 147-153.

19. Условные обозначения для крупномасштабных почвенных карт / «Росгипрозем». Сост. А.А. Жиров, В.М. Немцов, В.К. Кальван. – М.: Картографический филиал института «Росгипрозем». – 1974. – 47 с.

20. Wilson J.P. Estimating the topographic factor in the universal soil loss equation for watersheds // Soil Water Conserv. – 1986. – Vol.41. – P. 179-184.

21. Скрябина О.А. Водная эрозия почв и борьба с ней. – Пермь: Пермское книжное издательство. – 1990. – 244 с.

22. Кузнецов М.С., Глазунов Г.П. Эрозия и охрана почв. – М.: Изд-во МГУ. – 1996. – 335 с.

#### Цитирование:

Мудрых Н.М., Самофалова И.А., Чашин А.Н. Прогнозирование эрозионных потерь почвы с использованием модели RUSLE // АгроЭкоИнфо. – 2020, №4. – [http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2020/4/st\\_430.pdf](http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2020/4/st_430.pdf).