

The differentiation of an arable layer is most expressed at chisel and superficial tillage and mini-till and observed during all vegetative period, at turning is shown from the middle till the end of vegetation. Distinctions in soil density between layers of 0-10 and 10-20 cm are especially expressed at superficial tillage – 0.18-0.22 g/cm<sup>3</sup>.

On soil of normal humidifying turning, chisel tillage and mini-till provide satisfactory aeration of an arable layer – 50-53 %, superficial tillage – unsatisfactory – 48 %. On sandy rehumidified to soil satisfactory porosity is provided at turning and chisel tillage on depth 20-22 cm. Superficial and minimum tillage see lead to deterioration of aeration of soil as a result of decrease in porosity of a layer 10-20 cm.

On sandy soil of normal humidifying application within 3th years of the minimum system of tillage of soil provides increase of efficiency of a link of a crop rotation on 3 ts/hectares of grain units in comparison with turning, and system of superficial tillage, on the contrary, to authentic (on 4,2 ts/hectares of grain units) to its reduction. On rehumidified to soil replacement of turning with superficial and mini-till leads essential (on 3.4-3.7 ts/hectares of grain units) to decrease in productivity of cultures of a link of a crop rotation.

*Поступила 30 ноября 2011 г.*

УДК 631.459:681.518

## **ПРИМЕНЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ПОТЕРЬ ПОЧВЫ ОТ ЭРОЗИИ (RUSLE) ПРИ ОЦЕНКЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ВОДНО-ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ГИС**

**Горбачёва Е. Н.**

*Космоаэрогеология, г. Минск, Беларусь*

### **ВВЕДЕНИЕ**

По данным РУП «Институт почвоведения и агрохимии» площадь земель с потенциально возможным смывом почвы составляет около 1,443 млн. га или около 32 % территории Беларуси. Эродированные почвы на пашне занимают в Республике Беларусь 556 тыс. га (9,4 % от общей площади пашни). Из общей площади эродированных почв водной эрозии подвержено 84 % [1].

Увеличение масштабов сельскохозяйственного воздействия на почвенный покров требует усовершенствования управления земельными ресурсами, в частности, локальных и региональных мониторинговых наблюдений за состоянием почвенного покрова (в пределах отдельных полей и водосборов).

Эта необходимость определяет поиск эффективных инструментов анализа и интерпретации большого объема пространственных данных о структуре почвенного покрова, факторах почвообразования и характере землепользования. Всё это находит отражение в развитии геоинформационных систем, ориентированных на работу с пространственной информацией, хранимой в базе данных, а также модернизации инструментов моделирования различных уровней сложности – создания комплексных, физически обоснованных моделей, прогнозирующих результаты воздействия природных и антропогенных процессов на состояние ландшафта в каждой точке изучаемого пространства.

## 1. Почвенные ресурсы и их рациональное использование

Моделирование процесса водной эрозии почвенного покрова, является сложной и до конца не решенной проблемой. Одной из важнейших задач эрозионных исследований является оценка эрозионной опасности почв.

Эрозионно-опасными считаются такие почвы, где сочетания природных условий (климат, рельеф, почвообразующие и подстилающие породы, осадки) создают возможность проявления эрозии почв при их сельскохозяйственном использовании. Эрозионная опасность оценивается величиной потенциального смыва. В настоящее время существует ряд моделей эрозии почвенного покрова – AGNPS (Agricultural Non-Point-Source Pollution Model) (Young et al, 1985), WEPP (Water erosion prediction project) (Foster and Lane, 1987), USLE (Universal Soil Loss Equation) (Wischmeier and Smith, 1978), RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) (Renard et al) и MUSLE (Modification Universal Soil Loss Equation), реализация которых частично представлена в различных программных системах [2]. Эти модели базируются на разделении водораздела на отдельные ячейки регулярной сети и назначении каждой ячейке набора атрибутов, таких как значение уклона, длины склона, эрозионной интенсивности дождя, коэффициента эродированности почвы и др.

Большинство программных средств, полностью реализующих подобные модели, представляют собой исследовательские версии, методы и алгоритмы которых требуют дополнительного анализа и оценки эффективности. Эффективность практического использования моделей во многом определяется наличием исходной информации, поэтому при разработке современных моделей эрозии почвенного покрова ставится задача создания модели, для которой требуется минимум доступной информации.

Целью данного исследования является оценка возможности применения универсального уравнения потерь почвы от эрозии (RUSLE) при прогнозе проявления водно-эрозионных процессов в условиях холмистого рельефа Минской возвышенности с использованием современной ГИС (ArcGis 10).

### МЕТОДИКА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Непосредственным объектом исследования являлись дерново-подзолистые почвы, развивающиеся на легких лессовидных суглинках. В качестве тестового полигона был выбран стационар «Стоковые площадки» Минского района. Тестовый полигон «Стоковые площадки» (СПК «Щемяслица») является многолетним стационаром РУП «Институт почвоведения и агрохимии». На территории тестового полигона расположено восемь стоковых площадок, на которых проводится изучение факторов водной эрозии почвенного покрова (рис. 1). Общая площадь участка – 0,8 км<sup>2</sup>. Климат региона умеренно континентальный. В среднем за год выпадает 646 мм осадков, из которых примерно 1/3 приходится на холодный, а 2/3 – на теплый период. Холодный период с преобладанием твердых и смешанных осадков приходится на ноябрь-март, теплый период преимущественно с жидкими осадками – на апрель-октябрь. Из общего количества осадков в году 75 % приходится на жидкие, 13 % – на смешанные, 12 % – на твердые. Среднегодовая температура 5,4 °С.

Эмпирическая модель RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), разработанная Ушмеером и Смитом и доработанная Ренардом и Фостером, является

простым математическим выражением, базирующимся на пяти основных факторах, определяющих интенсивность протекания водно-эрозионных процессов, что и обусловило ее выбор в качестве исходной в наших исследованиях. В качестве исходных данных в исследовании использовалась трехмерная модель рельефа, построенная по стереопаре аэрофотоснимков (масштаб 1:17 000), многолетние данные о факторе эрозионной интенсивности дождя, почвенные карты изучаемой территории (масштаба 1:10 000).



Рис. 1. Расположение стоковых площадок РУП «Институт почвоведения и агрохимии» на панхроматическом космическом изображении QuickBird

Пересмотренное универсальное уравнение потерь почвы от эрозии (RUSLE) имеет вид (Renard et al) [3, 4]:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P, (1)$$

где  $A$  – потенциальный смыв почвы, т/га в год;  $R$  – фактор эродирующей способности дождей,  $\frac{\text{Мегаджоуль} \cdot \text{мм}}{\text{га} \cdot \text{час} \cdot \text{год}}$ ;  $K$  – фактор податливости почв эрозии,  $\frac{\text{т} \cdot \text{га} \cdot \text{час}}{\text{га} \cdot \text{Мегаджоуль} \cdot \text{мм}}$ ;  $L$  – фактор длины склона (безразмерный);  $S$  – фактор крутизны склона (безразмерный);  $C$  – фактор растительности и севооборота (безразмерный, изменяющийся от 0 до 1);  $P$  – фактор эффективности противоэрозионных мероприятий (безразмерный, изменяющийся от 0 до 1).

В наших исследованиях устанавливался максимальный потенциальный смыв почвы, поэтому значения фактора растительности и севооборота (С), а также фактора эффективности противоэрозионных мероприятий (Р) принимались равными единице.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эффективность использования модели RUSLE во многом зависит от количественной интерпретации входящих в неё параметров.

В нашем исследовании значения эрозионного индекса осадков (R) устанавливались на основании традиционного подхода, предложенного Ушмеером и Смитом:

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{k=1}^m (E)_k (I_{30})_k \right], \quad (2)$$

где  $E$  – суммарная кинетическая энергия дождя (МДж/га);  $I_{30}$  – максимальная интенсивность дождя за 30-минутный непрерывный промежуток времени;  $R$  – эрозионный индекс дождя ( $\frac{\text{Мегаджоуль} \cdot \text{мм}}{\text{га} \cdot \text{час} \cdot \text{год}}$ ) [3, 4].

Фактор податливости почв эрозии (К) обычно определяется с использованием номограмм и формул, опубликованных Ушмеером и Смитом. Однако, в связи с тем, что эти уравнения разработаны специально для обширных участков США (для которых USLE было разработано первоначально), они дают неточные результаты при определении эрозионной устойчивости хорошо агрегированных и специфических почв в Европе. Поэтому при определении фактора эродированности почв участка нами использовался подход, предложенный Römken и усовершенствованный Ренардом:

$$K = 0,1317 \cdot 7,594 \left( 0,0034 + 0,04 \exp \left[ -0,5 \left( \frac{\log(D_g) + 1,659}{0,7101} \right)^2 \right] \right), \quad (3)$$

где  $D_g$  – средний диаметр частиц почвы, определяющийся в соответствии со следующим выражением:

$$D_g = \exp(0,01 \sum f_i \ln(m)_i), \quad (4)$$

где  $f_i$  – доля фракции в процентах;  $m_i$  – среднее арифметическое минимального и максимального размера частиц фракции [5].

Вычисление длины склона по цифровой модели рельефа (ЦМР) является наиболее проблематичным в моделировании эрозии почвенного покрова. Существует несколько основных подходов к определению этого параметра в ГИС. Большинство из них основаны на теории мощности потока (Mitasova, 1996, Moog and Wilson, 1992, Moog and Burch, 1986) и вычислении суммарного потока (Desmet and Govers, 1996) как замены фактической длины склона. Предложенные подходы требуют реализации и усовершенствования в ГИС функций гидрологического анализа водосборов. В наших исследованиях при определении топографического фактора (LS) использовался подход модели RUSLE, модифицированный американским ученым Маккулом [4, 6].

$$LS = \left( \frac{A \cdot D}{22,1} \right)^m \left( \frac{\sin \alpha}{0,0896} \right)^n, \quad (5)$$

где A – грид-тема слоя стока, рассчитываемая на основании данных ЦМР с использованием встроенной функции гидрологического анализа в ArcGis Spatial Analyst;  $\alpha$  – растровая тема уклонов в градусах, полученная по ЦМР с использованием инструмента Уклон ArcGis; D – длина ячейки ЦМР в метрах.

$$m = \frac{\beta}{\beta + 1}, \quad (6)$$

$$\beta = (\sin \alpha / 0,0896) / (3,0 \cdot (\sin \alpha)^{0,8} + 0,56). \quad (7)$$

В ArcMap расчет топографического фактора на основании указанного выражения проводится с использованием инструмента Raster Calculator.

Построение гидрологических моделей требуют безупречных, то есть логически безошибочных исходных данных, так как разрешение и точность построения ЦМР определяют правильность установления направления потока, а, следовательно, и потенциального смыва почвы. Ошибки в установлении направления потока возникают при недостаточном вертикальном разрешении полученной ЦМР, а также при пересечении линией стока большого количества ям (провалов) и неровностей поверхности природного или антропогенного характера. При низком разрешении ЦМР микроформы, уменьшающие или увеличивающие сток, не учитываются, что приводит к ошибкам в оценках потерь почвы от эрозии. Таким образом, ЦМР подразумевает наличие потенциальных ошибок в своих данных и, как следствие, наличие некоторых неточностей в полученных на их основе картах эрозионно-опасных почв.

Для ликвидации ошибок исходной ЦМР целесообразно использование методов интерполяции и аппроксимации.

Построение цифровой модели рельефа по стереопаре аэрофотоснимков (1:17 000) осуществлялось в программе PHOTOMOD. Интерполяция исходной ЦМР осуществлялась с помощью инструмента Tero to raster (модуль ArcGis Spatial Analyst). Параметры ЦМР, а также топографический фактор потенциального смыва почвы определялись ПО ArcGis 10. Значения потенциального смыва почвы, измеряемого в тоннах на гектар в год, устанавливались на основании модели эрозии почвенного покрова RUSLE с использованием программы ArcGis 10 с модулем Spatial Analyst и встроенных инструментов картографической алгебры (Hydrologic Analysis, Raster Calculator).

Определение среднего многолетнего потенциального смыва почвы осуществлялось в пределах водосбора опытного стационара «Стоковые площадки» на территории СПК «Щемьслица».

Моделирование водной эрозии почвенного покрова на основе Универсального уравнения потерь почвы от эрозии выполнялось на растровых данных в формате грид (размер ячейки 1 м). Цифровая модель рельефа на территорию тестового участка была построена по стереопаре аэрофотоснимков в программе PHOTOMOD.

Основным видом модели рельефа в модуле PHOTOMOD DTM является нерегулярная пространственная сеть треугольников – TIN (Triangulated Irregular Network).

## 1. Почвенные ресурсы и их рациональное использование

Нерегулярная модель рельефа **TIN** (Triangulated Irregular Network), предназначена для последующего создания по ней регулярной модели – матрицы высот (ЦМР), а также горизонталей.

Опорные точки, на основании которых была построена ЦМР, были получены с использованием GPS-приёмников в процессе полевых исследований. С помощью векторных объектов (структурных линий) уточнялись такие элементы поверхности, как бровки, тальвеги и т. п., что находит применение при создании модели рельефа территории с развитой овражно-балочной сетью.

В нашем случае TIN построена с помощью триангуляции существующих векторных объектов (рис. 2).

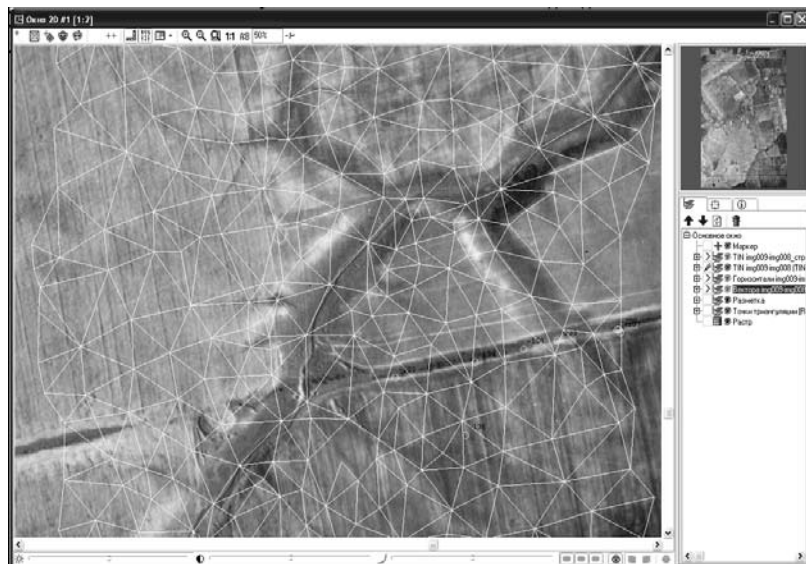
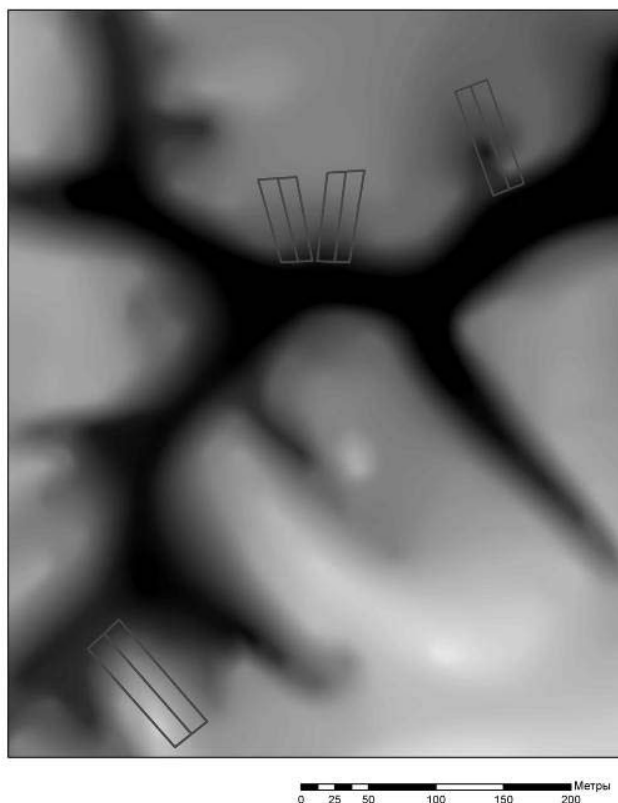


Рис. 2. TIN по векторным объектам территории тестового полигона «Стоковые площадки» (СПК «Щемыслица»)

Модель рельефа, представленная в виде нерегулярной сети треугольников TIN, являлась исходным материалом для построения горизонталей рельефа.

Полученная цифровая модель рельефа для удаления ошибочных значений, ям и локальных повышений была интерполирована в ArcGis 10 с использованием инструмента *Tin to grid*. В результате чего была получена матрица высотных отметок рельефа (размер ячейки 1x1 м, угловая единица измерения 0,01745 град, максимальная высота 378,8 м) представленная на рис. 3. Данная матрица высот являлась основой при определении топографического фактора LS. Грид-файл (матрица высот) представляет собой готовую сетку для расчетов при численном решении уравнений, определяющих динамику эрозионных процессов, протекающих на рассматриваемой территории.

Значения топографического фактора (LS) для каждой ячейки матрицы высот рассчитаны на основании формул 5, 6, 7 в модуле ArcGis Spatial Analyst. Расчет уклона склона был осуществлен на основании стандартного алгоритма ArcGis. Полученная растровая тема топографического фактора на территорию стационара «Стоковые площадки» представлена на рис. 4.



*Рис.3.* Матрица высотных отметок рельефа территории тестового полигона «Стоковые площадки» (минимальная высота 199,9 м, средняя высота 227,98 м, максимальная высота 238,3 м, среднее квадратическое отклонение 5,62)

Значение фактора эрозионной интенсивности дождя остаётся неизменным на всей изучаемой территории. Среднее многолетнее значение фактора эрозионной интенсивности дождя определялось на основании данных о значениях фактора (май-сентябрь) полученных на гидрометеостанции «Минск» в период с 1961 по 1985 г.

Оценка фактора эрозионной устойчивости почв к эрозии выполнен на основании данных почвенной карты территории исследования масштаба 1:10 000. После оцифровки карта была переведена в растровый формат с использованием ПО ArcGis 10. Почвы исследуемого участка дерново-палево-подзолистые, развивающиеся на мощных пылеватых (лессовидных) легких суглинках. Значения параметра D и фактора противоэрозионной стойкости почв (K) были рассчитаны на основании данных о размере преобладающих фракций и их процентном соотношении в почве. В поверхностном (пахотном) горизонте дерново-палево-подзолистой почвы, развивающейся на мощных пылеватых (лессовидных) легких суглинках, преобладает фракция размером частиц 0,05-0,01 мм – 63,3 %, содержание фракции размером частиц 0,01 мм и менее – 20,7 %, 0,25-0,05 мм – 15,2 %, 1-0,25 мм – 0,7 %.



Рис. 4. Отображение результирующего растрового слоя топографического фактора эрозии LS территории тестового полигона «Стоковые площадки» (максимальное значение 378,8, минимальное значение 0, среднее значение 1,68, среднее квадратическое отклонение 5,03)

Значение параметра  $D$ , вычисленное на основании формулы 4, равняется 0,03, значение фактора эрозионной устойчивости почв к эрозии определялось на основании формулы 3 и составляет  $0,042 \frac{\text{т} \cdot \text{га} \cdot \text{час}}{\text{га} \cdot \text{Мегаджоуль} \cdot \text{мм}}$ .

Значения потенциального смыва почвы были установлены путем перемножения значений факторов, входящих в уравнение с использованием картографической алгебры (инструмент Raster Calculator ArcGis 10). В результате чего была получена растровая тема потенциального смыва почвы, представленная на рис. 5.

Данные о величине потенциального смыва почвы, полученные с использованием предлагаемой методики, в целом хорошо согласуются с имеющимися в лаборатории агрофизических свойств и защиты почв от эрозии РУП «Институт почвоведения и агрохимии» многолетними результатами полевых наблюдений за интенсивностью эрозии при различном использовании почв опытного стационара. При этом необходимо отметить более значительные различия фактических и расчетных данных на склонах с уклоном более 7 градусов. Однако такие земли практически не используются в качестве обрабатываемых.





Рис. 5. Отображение результирующего растрового слоя потенциального смыва почвы территории тестового полигона «Стоковые площадки»

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее достоверное построение цифровых моделей рельефа (ЦМР) основано на данных топографической съёмки, однако проведение подобных исследований на обширных или труднодоступных территориях зачастую невозможно, или экономически невыгодно. В этой связи целесообразно создание эффективных инструментов построения ЦМР по стереоданным аэрофото- и космосъёмки, в частности для целей почвенно-эрозионного моделирования. Это требует решения ряда вопросов по определению оптимального разрешения (вертикального и горизонтального) ЦМР при вычислении уклонов и длин склонов, входящих в модель RUSLE.

Применение эмперической модели RUSLE для оценки среднего многолетнего потенциального смыва почвы с использованием современных ГИС-технологий в условиях Республики Беларусь может быть признана перспективной. Исполь-

зование рассмотренного способа позволит оперативно проводить мониторинг почвенных ресурсов при составлении и обновлении почвенных карт. Выявление эрозионно-опасных участков почвенного покрова позволит своевременно корректировать направление ведения сельского хозяйства и предупредить потерю плодородного слоя почвы от эрозии.

Однако для получения корректных данных о потенциальном смыве почвы необходимо провести ряд теоретических и экспериментальных исследований по определению факторов, входящих в уравнение. В частности, при определении фактора эродруемости почвы целесообразно учесть процентное содержание гумуса в почве. Кроме того необходимо проанализировать возможность применения других подходов к определению топографического фактора LS и алгоритма расчета уклона склона.

Анализ полученных данных о потенциальном смыве почвы на территории тестового полигона «Стоковые площадки» Минского района показал некоторое его завышение на склонах с уклоном более 7 градусов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование противоэрозионных комплексов и использование эрозионно-опасных земель в разных ландшафтных зонах Беларуси / БелНИИПА; под ред. А. Ф. Черныша. – М, 2003.

2. Моделирование эрозионных процессов на территории малого водосборного бассейна / А. С. Керженцев [и др.]; Ин-т фундамент. проблем биологии РАН. – М.: Наука, 2006. – С. 224

3. Wischmeier, W. H. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning / W. H. Wischmeier, D. D. Smith // DC: Science and Educational Administration, US department of Agriculture. – Washington, 1978. – P. 400.

4. Predict Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). / K. G. Renard [et al]; Agricultural Research Service. – Washington, 1997. – P. 404.

5. Römken. The soil erodibility factor: a perspective // Soil erosion and conservation / Moldenhauer and Lo. – Ankeny, 1985.

6. Revised Soil Loss Equation / D. K. McCool [et al] // Transactions of American Society of Agricultural Engineers. – 1989. – №32(5) – P.1571-1576.

### **RUSLE MODEL IMPLEMENTATION FOR ESTIMATION INTENSIVITY OF WATER EROSION PROCESSES ON BELARUSSIAN SOIL COVER**

**E. N. Gorbacheva**

#### **Summary**

The main results of RUSLE-GIS model implementation for soil loss estimation in Minsk region are presented. The conclusions about necessity of methods of soil loss factors correction and determination of DEM optimal spatial resolution for different scale of mapping are drawn.

*Поступила 10 ноября 2011 г.*