

## ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ СКЛОНОВОЙ ЭРОЗИИ МЕТОДОМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

*Гафуров А.М.\* , Ермолаев О.П.\* , Усманов Б.М.\**

\*Казанский федеральный университет, Казань, [busmanof@kpfu.ru](mailto:busmanof@kpfu.ru)

## SLOPE EROSION INTENSITY ESTIMATION WITH TERRESTRIAL LASER SCANNING METHODS

*Gafurov A.M.\* , Yermolaev O.P.\* , Usmanov B.M.\**

\*Kazan Federal University, Kazan, [busmanof@kpfu.ru](mailto:busmanof@kpfu.ru)

### Введение

Эрозионные процессы на распаханых склонах являются основной причиной антропогенной деградации почв. Это связано с тем, что скорость природно-антропогенной эрозии может на порядки превышать скорость природного восстановления почв. Именно поэтому во всем мире уделяется столь много внимания изучению склоновой эрозии. Для этого разработан большой набор разнообразных методов регистрации эрозии. Однако, по-прежнему, не решены задачи количественной оценки интенсивности эрозии в различных звеньях временной гидрографической сети. Такое положение обусловлено большим разнообразием типов поверхностного стока, механизмов эрозии и возникающими в результате их действия морфологических форм эрозии на склонах.

Осложняет наблюдения за эрозией и огромное количество факторов, влияющих на нее, а также высокая пространственная вариабельность процесса. На склонах, как известно, находит развитие плоскостная, микроручейковая и линейная (промоинная и овражная) эрозия. Все эти виды эрозии протекают с различными скоростями. Наиболее разработаны методики наблюдения за овражной эрозией в силу ее хорошего морфологического отражения в рельефе и высоких скоростей. Однако в звене микроручейковой и плоскостной эрозии ни один из существующих сейчас методов пока не позволяет судить о реальных темпах смыва почв этими видами эрозии. Обусловлено это в первую очередь очень малыми скоростями процессов смыва почв, морфологической нечеткостью эрозионных форм и сложностью организации повторных наблюдений на распаханых землях. Тем не менее, оценка интенсивности ручейковой и плоскостной эрозии является принципиально важной задачей, поскольку на эти виды эрозии приходится более 2/3 поверхности склона и почти все площади распаханых земель. То есть, этот вид эрозии является доминирующим по площади своего проявления на пахотных землях обширных пространств лесостепной и степной зоны Русской равнины.

Обзору методов наблюдения за внутригодовой и межгодовой эрозией в звене микроручейковых размывов посвящено множество работ [1, 2, 3, 4]. Здесь можно ограничиться лишь их перечислением: метод стоковых площадок, замер объема линейных размывов, фотограмметрический метод, фотопрофилирование поверхности почвы, метод трассеров и некоторые другие.

Все методы имеют свои преимущества и недостатки. Последних, к сожалению, достаточно много. По этой причине все оценки объемов смытой почвы, слоя смыва исследователями даются осторожно.

В настоящее время появились новые технические возможности оценки почвенной эрозии. Они связаны с появлением новых геодезических инструментов. В частности, это наземные лазерные сканирующие устройства, позволяющие проводить дистанционную съемку эрозии на пашне с высочайшей точностью (доли мм) и недостижимой для традиционных замеров частотой (миллионы точек измерения). Можно отметить следующие практические преимущества наземного лазерного сканирования (НЛС): высокая скорость измерений без потерь в точности; полная цифровая модель объекта; выполнение работ при любых условиях освещения; существенное сокращение временных и других ресурсных затрат; съемка труднодоступных и сложных объектов; полная автоматизация процесса измерений; измерения геометрических параметров по полученной цифровой 3D-модели; хранение 3D-информации об объекте в цифровом виде; многоцелевое использование результатов лазерного сканирования.

В России и других странах использование методов наземного лазерного сканирования для оценки почвенной эрозии в настоящее время находится на начальном этапе. Так, методы НЛС позволяют фиксировать эрозионные изменения почвы в результате лесохозяйственной деятельности [5], пожаров [6], срочные изменения почвенного покрова в результате деятельности ливней [7], количественная оценка изменений берегов рек в результате флювиальных процессов на реках [8]. Стоит отметить, что методы НЛС одинаково эффективны для мониторинга и оценки не только микроручейковой и овражной эрозии [9], но и оползневых процессов [10]. В то же время, практически нет работ по оценке ручейковой эрозии на склонах за периоды талого и ливневого стока.

В целом, если опустить модельные особенности каждого отдельного лазерного сканера, методика съемки и предварительной обработки выглядит следующим образом: 1) позиционирование сканируемой территории с помощью сети опорных пунктов [11], либо по характерным точкам [12]; 2) съемка объекта изучения с помощью лазерного сканера с максимально возможной необходимой точностью; 3) отсеивание "шума", артефактов [11]; 4) сшивка сканов [10].

Мировая практика лазерного сканирования показала, что для обработки данных наиболее чаще всего используются следующие комплекты программного обеспечения: Surfer 8-10 [7], Polyworks, I-Site Studio, Cyclone, Faro-Scene, JRC-3D- Reconstructor [12], Riegl Riscan PRO [9].

### Метод

Наш доклад посвящен разработке методики использования НЛС для оценки склоновой эрозии. Приведены первые результаты такого рода наблюдений. В качестве тестового нами был выбран обнаженный участок левого склона реки Казанки (г. Казань). Исследуемый участок имеет координаты 55°48.163' N, 49°9.102' E и средний уклон 31.5°, юго-западную экспозицию, средняя длина склона составляет 18 м и относительное превышение 9м. Склон имеет прямолинейную форму поперечного профиля. Площадь участка 0,07 га. Ниже почвенного слоя литология грунта представлена тяжелыми делювиально-солифлюкционными суглинками.

Выбор участка обусловлен возникновением микроручейковых комплексов в результате сильных ливневых осадков из-за отсутствия верхнего слоя почв в связи с работами по его благоустройству. Первые съемки были проведены в апреле-июне в 2012 г., а затем и осенью 2013 г. Весной 2013 г. склон был укреплен георешеткой, сверху засыпан слоем торфа толщиной 5-7 см и засеян газонной травой. Однако в результате интенсивных летних дождей и большого слоя осадков осенью (сентябрь-октябрь) на склоне была зафиксирована микроручейковая эрозия. На отдельных участках склоновый сток смыл почвенный слой полностью и оголил георешетку. Не закрепился на склоне и травяной покров, который является серьезным препятствием для лазерного сканирования. Таким образом, проведены наблюдения за развитием ручейковой и плоскостной эрозии как после талого стока (2012 г.), так и в период выпадения осенних дождей (2013 г.).

В 2012 г. началась отработка методики сканирования эрозионных процессов и был отсканирован небольшой фрагмент склона «С». В 2013 г. для анализа были выбраны 2 незадернованных участка «А» и «Б» (Рис. 1), визуально отличающихся интенсивностью протекания эрозионных процессов – на левом ручейковая сеть более густая, а сами русла морфологически выражены лучше. У подошвы участка оголилась георешетка.

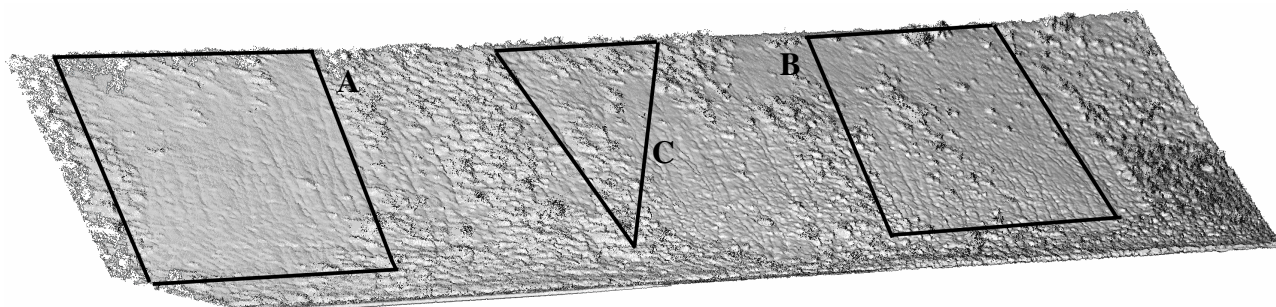


Рисунок 1. Фрагменты экспериментального участка склона, выбранные для дальнейшего анализа (А, В – 2013 г., С – 2012 г.)

### Материалы и методика

**Постановка наблюдений.** Для съемки нами был использован наземный лазерный сканер Trimble GX, сканирование проводится с помощью интерфейса программы Trimble PointScope. Такие параметры, как дальность измерения до 350 м, скорость измерений до 5000 точек в секунду, высокая точность измерений – от 1,4 до 6,5 мм в зависимости от дальности, высокая разрешающая

способность сканера (до 3 мм на 100 м) и малый угловой размер лазерного пятна (6 мм на 100 м), - позволяют получить подробную 3D-модель объекта, расположенного на значительном удалении.

С учетом перечисленных факторов и принимая во внимание особенности протекания эрозионных процессов, были определены технические условия и порядок проведения полевого эксперимента с помощью метода лазерного сканирования:

При изучении эрозионного склона сканер был установлен нами на расстоянии 30 м от объекта, использовался режим съемки fast (color), разрешение 15 мм на расстоянии 25 метров, осуществлялось 4 «выстрела» на одну точку. В среднем за каждую дату результате было получено облако точек

**Обработка результатов.** Для обработки полученных данных было использовано программное обеспечение Trimble RealWorks 6.5. Эта программа позволяет выполнять сшивку сканов, редактирование полученных облаков точек и выполнять разного рода расчеты. Сшивка по маркам проводилась в полуавтоматическом режиме в программном обеспечении Trimble RealWorks 6.5. Далее в программе Trimble RealWorks по облакам точек были составлены карты разностей за все промежутки между съемками (Рис. 2). Карты составляются путем проецирования на горизонтальную плоскость, размещаемую вдоль простираения склона.

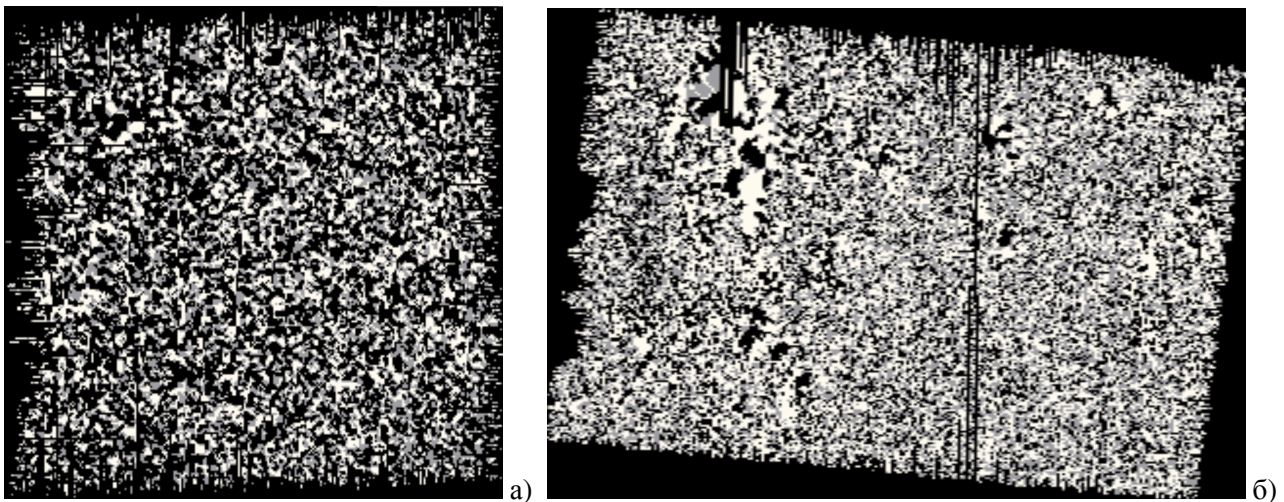


Рисунок 2. Пример карт разностей в средней части склона: а) участок Б, б) участок А.  
Белый цвет – аккумуляция, черный – эрозия, серый – отсутствие изменений  
в пределах точности сканера ( $\pm 2,5$  мм).

Таким образом, мы можем количественно оценить произошедшие на склоне изменения в результате эрозионно-аккумулятивных процессов, подсчитать объемы смыва и аккумуляции после каждого события стока. Для большей наглядности карты разностей накладывались на TIN-модели, также построенные непосредственно по облакам точек. Также определялись количественные характеристики эрозионно-аккумулятивных процессов в верхней, средней и нижней частях склона. Для этого с помощью инструмента Volume Calculation вычислялось уменьшение-увеличение объема грунта ( $V_-$ ,  $V_+$ ,  $m^3$ ) на исследуемом фрагменте склона. Затем по площади участка ( $S$ ) определялся слой эрозии ( $i+$ ), аккумуляции ( $i-$ ) в мм; преобладающий процесс ( $\Delta i$ ), а также объем смыва-аккумуляции ( $E$ ,  $m^3/га$ ).

$$i- = \frac{V_-}{S}, \text{ мм}; i+ = \frac{V_+}{S}, \text{ мм}; \Delta i = \frac{V_+ - V_-}{S}, \text{ мм}; E = \frac{V_+ - V_-}{S} * 10000, m^3/га.$$

### Результаты

Первый период наблюдений проведен в 2012 г. на склоне после завершения периода талого стока и первых двух весенних ливней, образовавших поверхностный сток. На тот период склон был полностью обнажен и еще не покрыт почвой. На поверхность выходили тяжелые делювиально-солифлюкционные суглинки плотностью  $1,6 \text{ г/см}^3$ . После талого стока, благодаря большой крутизне, высокой влажности и состава пород, по всему фронту средней и нижней части склона сформировались многочисленные оплывины. Их возникновение связано с солифлюкцией и оползнями. Возникновение этих процессов наблюдалось нами при таянии снега в марте (6.03-9.03) 2014 г. Так, высота сплошного снежного покрова на этот момент составила 33 - 53 см, запас воды в снеге (при плотности  $0,3 \text{ г/см}^3$ ) колебался от 120 мм в верхней и средней до 168 мм – в нижней части склона. Однако при высокой интенсивности снеготаяния (снег растаял за 3-4 дня) видимой пелены стока так и не было сформировано. Процесс сход снега происходил за счет его радиационного

испарения (установилась безоблачная погода) днем, большого эффективного излучения с поверхности ночью и собственного длинноволнового излучения глубинных слоев снега. В результате этого в течение 3-4 дней склон в верхней и средней частях полностью освободился от снега. В то же время почва оттаяла лишь на 0,5-1,5 см. Поступающая из снега вода сильно увлажнила почвенно-грунтовый слой. В результате при высоких уклонах склона он приобрел свойства текучести. Как следствие этого, наблюдалось повсеместное развитие процессов солифлюкции и оползания. В последующем почти все оползневые тела были размывы ливневым стоком в форме ручейковой эрозии. Здесь сформировалась морфологически хорошо выраженная густая сеть ручейков. Максимальная ширина ручьев составляла 15-20 см, а глубина – 8-10 см. Анализ полученных результатов (Табл. 1) свидетельствует о высокой интенсивности идущих здесь экзогенных процессов. На участке в верхней части склона доминирует аккумуляция (3,5 мм или 57 т/га); в средней части денудация (4,1 мм или 66,1 т/га), в нижней части также преобладает денудация (4,3 мм или 68,4 т/га). В целом по всему склону за период наблюдений (апрель-июнь 2012 г.) слой денудации составил 0,6 мм (или 10,4 т/га). Учитывая, что наблюдаемые участки значительно превышают по своей крутизне пахотные земли, эти значения близки к средним, полученным ранее для пахотных почв лесной и лесостепной зоны Русской равнины [3].

Таблица 1.

Результаты обработки съемки апрель-июнь 2012 г.

Части склона	S, м <sup>2</sup>	V <sub>-</sub> , м <sup>3</sup>	V <sub>+</sub> , м <sup>3</sup>	V <sub>+</sub> - V <sub>-</sub> , м <sup>3</sup>	i <sub>-</sub> , мм	i <sub>+</sub> , мм	Δi, мм	E, м <sup>3</sup> /га
Верхняя часть	18,3	0,041	0,106	+0,065	2,2	5,7	+3,5	+35,5
Середина	14,0	0,080	0,022	-0,058	5,7	1,6	-4,1	-41,4
Нижняя часть	7,7	0,040	0,007	-0,033	5,2	0,9	-4,3	-42,9
<b>Весь склон</b>	<b>40</b>	<b>0,161</b>	<b>0,135</b>	<b>-0,026</b>	<b>4,0</b>	<b>3,4</b>	<b>-0,6</b>	<b>-6,5</b>

S, площадь участка; V<sub>-</sub>, уменьшение объема грунта; V<sub>+</sub>, увеличение объема грунта; i<sub>+</sub>, слой аккумуляции; i<sub>-</sub>, слой эрозии; Δi, преобладающий процесс; E, объем смыва-аккумуляции.

Второй период наблюдений проведен осенью 2013 г. Как уже отмечалось, летом склон был покрыт слоем торфа, который был искусственно уплотнен для посадки газона. Среднюю плотность почвенного слоя можно принять 0,8 г/см<sup>3</sup>. За период ливневых дождей летом на нем сформировалась система ручейковых размывов, но оценка эрозии с помощью НЛС нами не проводилась в связи с большим проективным покрытием травой. Признавая очевидным тот факт, что основная эрозия на склонах возникает в результате выпадения ливневых дождей, мы поставили задачу ее оценки в период осенних дождей. Этот аспект во флювиальной геоморфологии мало изучен, поскольку предполагается, что осенью склоновый сток минимален по причине выпадения дождей малой интенсивности. Нет стокообразующих осадков, нет и эрозии. Однако проведенные нами исследования показывают, что это далеко не так. Важна не только характеристика интенсивности осадков, но и другие параметры: степень влажности почвы, ее покрытие растительностью, морфометрия склона и др.

Таблица 2.

Результаты обработки съемки НЛС 4 и 18 октября 2013 г.

Части склона	S, м <sup>2</sup>	V <sub>-</sub> , м <sup>3</sup>	V <sub>+</sub> , м <sup>3</sup>	V <sub>+</sub> - V <sub>-</sub> , м <sup>3</sup>	i <sub>-</sub> , мм	i <sub>+</sub> , мм	Δi, мм	E, м <sup>3</sup> /га
<b>А</b> верхняя часть	23,92	0,13	0,07	-0,06	5,4	2,9	-2,5	-25,08
<b>А</b> середина	26,07	0,12	0,05	-0,07	4,6	1,9	-2,7	-26,85
<b>А</b> нижняя часть	24,27	0,11	0,06	-0,05	4,5	2,4	-2,1	-20,60
<b>А – весь склон</b>	74,26	0,36	0,18	-0,18	4,8	2,4	-2,4	-24,23
<b>В</b> верхняя часть	39,24	0,09	0,12	+0,03	2,3	3,0	+0,7	+7,65
<b>В</b> середина	46,37	0,11	0,14	+0,03	2,4	3,0	+0,6	+6,47
<b>В</b> нижняя часть	41,06	0,09	0,14	+0,05	2,2	3,4	+0,8	+12,18
<b>В - весь склон</b>	126,67	0,29	0,4	+0,11	2,3	3,2	+0,9	+8,68

S, площадь участка; V<sub>-</sub>, уменьшение объема грунта; V<sub>+</sub>, увеличение объема грунта; i<sub>+</sub>, слой аккумуляции; i<sub>-</sub>, слой эрозии; Δi, преобладающий процесс; E, объем смыва-аккумуляции.

Осенью за период наблюдений (сентябрь-октябрь 2013 г.) выпал слой осадков 124 мм. Почвенный слой был уже сильно увлажнен осадками, выпавшими в сентябре. По всей видимости, именно этот фактор явился основным в формировании склонового стока при выпадении дождей слабой интенсивности. Склон был снят с двух станций 4 и 18 октября 2013 года после нескольких дождей с большим слоем осадков. В частности, первая съемка (4.10.2013 г.) произведена после трех дождей с общим слоем осадков более 70 мм; вторая (18.10.2013 г.) – после последнего осеннего дождя со слоем 18,1 мм. В таблице 2 приведены результаты определения эрозии и аккумуляции НЛС. На правом (В) участке склона во всех ее частях



преобладает слабая аккумуляция, значения которой лежат в пределах точности сканирования. В среднем по всему этому участку аккумуляция составила 0,9 мм ( $\approx 7$  т/га). На левом (А) же участке, наоборот, преобладает эрозия. Здесь средний слой денудации составил 2,4 мм или 19,4 т/га.

Аккумуляция на участке **В**, по всей видимости, обусловлена волнистой формой поперечного профиля, слабым боковым притоком воды с общего водораздела, сохранившимися ареалами дернового покрова в верхней и средней части склона, препятствующие формированию стока. Видимых изменений в системе ручейковых размывов здесь не обнаружено. Перемещение масс почв и грунтов происходит в основном за счет их оплывания и кольматации. Эти процессы хорошо видны по боковым стенкам ручейковых размывов.

На участке **А** повсеместно развита денудация. Связано это с тем, что участок **А** почти идеальной прямолинейной формы поперечного профиля более обнажен, получает боковой приток воды, поступающей с верхней части общего водораздела и имеет общий уклон к реке Казанки около 3 град.

#### Выводы

Разработан новый метод количественной оценки интенсивности ручейковой и плоскостной эрозии на склонах с помощью метода НЛС. Этот метод, обладая высокой точностью, ранее не возможной для других приборов, позволяет регистрировать разнообразные виды эрозии. Появляется возможность оценки денудационно-аккумулятивного баланса на склонах, определения динамики объемов перемещаемого материала в разных частях склона за различные события поверхностного стока, выявления пространственных закономерностей формирования ручейковых размывов. Кроме того, этот метод позволяет интегрально оценить суммарный эффект от протекания на склонах всего комплекса экзогенных процессов. Особую роль метод НЛС может сыграть в определении закономерностей развития овражных форм. Между тем, как и для любого другого метода, у него есть свои существенные ограничения: сканировать с высокой точностью можно лишь полностью обнаженные поверхности почв и грунтов, трудность при повторных наблюдениях на пашне (закрепление и сохранение реперов), учет требований к условиям съемки, и, как ни странно, - иногда излишне высокая плотность сканирования.

*Благодарности:* Исследование выполнено при финансовой поддержке грантов РГО (проект №13-05-41126) и РФФИ (проект №14-05-00503).

#### Литература

1. Заславский М.Н. Эрозиоведение. М.: Высшая школа, 1983. 320 с.
2. Голосов В.Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М.: ГЕОС, 1986. 260 с.
3. Ермолаев О.П. Эрозия в бассейновых геосистемах. Изд-во "Унипресс КГУ", Казань. 2002. 265 с.
4. Gregory, K.Y., Walling, D.E. Drainage basin form and process: a geomorphological approach. Edward Arnold Ltd., 1973. 458 p.
5. Dabek, P., Zmuda, R., Ćmielewski, B., Szczepański, J. Analysis of water erosion processes using terrestrial laser scanning. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 11(1), 2014, pp. 45-52.
6. Staley, D.M., Wasklewicz, T.A., Kean, J.W. Characterizing the primary material sources and dominant erosional processes for post-fire debris-flow initiation in a headwater basin using multi-temporal terrestrial laser scanning data. Geomorphology, 2014 (Article in press).
7. Bechet, J., Duc, J., Jaboyedoff, M., Loye, A., and Mathys, N. Technical Note: Erosion processes in black-marls at the millimetre scale, the input of an analogical model, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 11, 2014, pp. 2263-2275.
8. O'Neal, M.A., Pizzuto, J.E. The rates and spatial patterns of annual riverbank erosion revealed through terrestrial laser-scanner surveys of the South River, Virginia. Earth Surface Processes and Landforms, 36(5), 2011, pp. 695-701.
9. Perroy, R.L., Bookhagen, B., Asner, G.P., Chadwick, O.A. Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground-based LiDAR on Santa Cruz Island, California. Geomorphology. 118 (3-4), 2010, pp. 288-300.
10. Dunning, S.A., Massey, C.I., Rosser, N.J. Structural and geomorphological features of landslides in the Bhutan Himalaya derived from Terrestrial Laser Scanning. Geomorphology, 2009, 103(1), pp. 17-29.
11. Vaaja, M., Huypä, J., Kukko, A., Kaartinen, H., Huypä, H., Alho, P. Mapping topography changes and elevation accuracies using a mobile laser scanner. Remote Sensing, 3(3), 2011, pp. 587-600.
12. Afana, A., Solé-Benet, A., Pérez, J.L. Determination of Soil Erosion Using Laser Scanners. 19-th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 1 – 6 August 2010, Brisbane, Australia. Published on DVD, 2010, pp. 39-42.