

## Об эрозионной деятельности по деллям (на примере Забайкалья)

А.И. Куликов\*, Л.Л. Убугунов\*, А.Ц. Мангатаев\*,  
С.А. Ахунзянова\*\*, Т.М. Пигрова\*\*, Т.С. Усольцева\*\*

\*Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, Улан-Удэ, Россия

\*\*Бурятская государственная сельскохозяйственная академия

им. В. Р. Филиппова, Улан-Удэ, Россия

**Аннотация.** В Забайкалье целый ряд природных факторов благоприятствует развитию водной и ветровой эрозии. В статье изложены количественные показатели потери почвы в результате перманентной эрозии по деллям – линейным углублениям. Период жизни деллей более одного года. Они образуются склоновыми водами, которые осуществляют временный сток и транспорт почвенного материала. По наблюдениям делли имеют треугольную или трапециевидальную форму в поперечном сечении, а в продольном направлении копируют профиль склона. Проведены подробные морфометрические измерения модельного склона, что позволило повысить достоверность результатов исследований. Различие формы построенных эмпирических полигонов распределения объема деллей объективно указывает на разную интенсивность эрозионной деятельности в разных частях модельного склона. Об этом также свидетельствует дифференциация разных частей склона по условной работе по транспортировке почвенного материала при эрозии по деллям. Для расчетов реализуется модель Уишмейера и Смита, приведенная в метрической системе. Так впервые для региона определены такие важные характеристики, как ЭПР – эрозионный потенциал рельефа, ЭПО – эрозионный потенциал осадков. В соответствии с концепцией о допустимых потерях, впервые получившей развитие в США еще в 30-е годы XX в., проведен расчет величины ПДЭП – предельно допустимых эрозионных потерь почв. Для расчета ПДЭП в качестве исходных показателей выступало гумусное состояние каштановых почв в 50-е годы XX в. (0-момент), т.е. до начала целинной эпопеи. Эти данные ранее использовались при расчете кинетики содержания гумуса за XX в. Фактическое гумусное состояние принято равным среднеэродированным почвам. При этом полагаем, что именно эта категория земель еще способна удовлетворять потребностям растений. Расчетами показано, что в сухостепных ландшафтах Забайкалья потери при компенсированном почвообразовании составляют примерно 2 т/га/год. Деградация почв усугубляется опустыниванием и аридизацией. Показана пространственная дифференциация модельного склона по форме поперечного сечения деллей и диагностирующая роль эмпирических полигонов статистического распределения. Эрозионные потери почв оценены энергетически. Получены показатели предельно допустимых потерь при эрозии, соответствующие скорости почвообразования, а также временные параметры службы (долговечности) почв.

Ключевые слова: почва, эрозия, склон, делли, статистическое распределение.

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Проекта 16.1 Программы фундаментальных исследований Президиума РАН, Проекта Д-2.6 совместных работ Сибирского отделения РАН, АН Монголии, Министерства образования, культуры и науки Монголии.

DOI 10.31242/2618-9712-2018-24-2-94-103

## About erosion activity by dells (on example of Transbaikalia)

A.I. Kulikov\*, L.L. Ubugunov\*, A.Ts. Mangataev\*,  
S.A. Ahunzyanova\*\*, T.M. Pigrova\*\*, T.S. Usoltseva\*\*

\*Institute of General and Experimental SB RAS, Ulan-Ude, Russia

\*\*V.R. Philippov Buryat State Agricultural Academy, Ulan-Ude, Russia

**Abstract.** *In Transbaikalia, a number of natural factors favour development of water and wind erosion. The article presents quantitative indicators of soil loss as a result of the permanent erosion in dells – linear grooves. A dell lifetime is more than one year. They are formed by slope waters, which carry out temporary runoff and transport of soil material. According to observations, the dells have a triangular or trapezoidal shape in a cross section, and in the longitudinal direction a profile of the slope is copied. Detailed morphometric measurements of the model slope were carried out, which allowed increasing reliability of the research results. The difference in the shape of constructed empirical polygons of distribution of volume of dells objectively indicates a different intensity of erosion activity in different parts of the model slope. This is also evidenced by the differentiation of different parts of the slope by the conditional work on the transport of soil material under erosion by dells. For calculations, the model of Wislmeyer and Smith, given in the metric system, is implemented. Thus, for the first time in the region such important characteristics as EPR-erosion potential of relief, EPP – erosion potential of precipitation are determined. In accordance with a concept of allowable losses, which was developed for the first time in the United States in the 30-ies of XX century, the calculation of the value of MAEL – maximum allowable erosion losses of soils is conducted. The humus state of chestnut soils in the 50s of the XX century (0-moment), i.e. before the beginning of the virgin soil epic, was used as the initial indicators for the calculation of MAEL. These data were previously used to calculate the kinetics of humus content for the XX century. The actual humus status is assumed to be equal to the moderately eroded soils. At the same time, we believe that exactly this category of land is still able to meet the needs of plants. The calculations show that in the dry steppe landscapes of Transbaikalia the losses in compensated soil formation are approximately 2 t/ha/a. Soil degradation is exacerbated by desertification and aridization. Spatial differentiation of the model slope according to the form of the cross section of the dells and a diagnosing role of the empirical polygons of statistical distribution are shown. The soil erosion losses are estimated energetically. The indicators of the maximum permissible losses during the erosion, corresponding to the rate of the soil formation, as well as the temporal parameters of the service (durability) of soils, were obtained.*

Key words: soil, erosion, slope, dells, statistical distribution.

*Acknowledgments.* The work was carried out with partial financial support of Project 16.1 of the Basic Research Program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Project D-2.6 of the joint work of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, the Mongolian Academy of Sciences, The Ministry of Education, Culture and Science of Mongolia.

### Постановка проблемы

В Забайкалье развитию эрозии способствуют следующие факторы: 1) широкое (более 90% территории) распространение наклонных поверхностей; 2) концентрирование атмосферных осадков в коротком (июль–август) временном диапазоне; 3) наличие значительных площадей почв с высокой пылеватостью, карбонатностью, низкой гумусностью и водопрочной оструктуренностью. Особенности региональных условий заключаются также в том, что эрозия осложняется интенсивными процессами дефляции. Поэтому в природе Забайкалья водная эрозия и дефляция часто протекают одновременно, усиливая друг друга, т.е. имеет место интегративная эрозия [1].

Эрозия имеет множество проявлений. Среди них наиболее впечатляет линейная эрозия, которая в крайнем своем развитии приводит к образованию глубоких и протяженных оврагов. С овражной эрозией связано экстремальное проявление эрозии с катастрофически быстрым размывом почв и грунтов [2]. Быстротечность и редкость (обычно при ливнях около 1 % вероятности превышения или техногенных авариях на гидротехнических сооружениях) события – ос-

новные характеристики овражной эрозии. Как пример наиболее масштабного проявления овражной эрозии обычно приводят Южные Французские Альпы, где плотность оврагов равняется 161 шт./км<sup>2</sup> при горизонтальной расчлененности местности 23 км/км<sup>2</sup> и стоке наносов примерно 4,8 тыс. м<sup>3</sup>/год (модуль выноса 5,65 тыс. м<sup>3</sup>/год·км<sup>2</sup>). Заовраженность столь высока, что страна может потерять целый департамент. Эти значения как верхний экстремум могут служить реперными для сравнительных исследований.

Наряду с остромоментными событиями на склонах протекает большое множество перманентных явлений, к которым относится поверхностная (плоскостная) эрозия. Эта разновидность, известная как эрозия смыва, имеет визуально менее значительные масштабы и проявляется в виде эфемерных мелких струйчатых видов смыва. Струйчатые формы образуются ежегодно, но внешнее проявление ослабляется тем, что они часто маскируются или разрушаются объемными изменениями почв при промерзании и оттаивании, увлажнении и усыхании, при росте и развитии растений и др., особенно при вспашке, если почвы

находятся в культуре. На стадии эрозии размыва происходит формирование уже стабильно сохраняющихся в течение года и более отрицательных линейных форм, образующих специфический и довольно устойчивый микрорельеф. На естественных угодьях шансы для продолжения развития струйчатого смыва и достижения стадии размыва, как ни парадоксально, более велики. Тем самым промежуточной стадией между струйчатым (ручейковым, рывинным) смывом и образованием оврагов выступает размыв почв по деллям.

По нашему мнению, делли (от нем. Delle углубление) – треугольные или трапециевидные в поперечном профиле линейные углубления до 0,5 м, образовавшиеся за счет смыва-размыва почв временными потоками воды. Такое понятие не противоречит определению, приведенному в «Геологическом словаре» [3]. По пути следования водного потока делли копируют профиль склона, еще не имея собственного продольного профиля, поэтому поперечное сечение деллей в целом совпадает с живым сечением временных водотоков и обладает треугольной или трапециевидной формами в зависимости от удаленности от линии водораздела. Часто наблюдаются заросшие делли со смягченными формами, что позволяют судить о них как о достаточно старых образованиях.

В регионе эрозионные процессы в разных проявлениях и стадиях изучены рядом исследователей [4–9 и др.].

#### Объекты и методы

Эрозионная деятельность по деллям изучалась на склоне западной экспозиции в Тапхарской субкотловине – составной части Иволгинской котловины Байкальского региона. Склон занят холоднопопынной степью, представляющей собой дигрессионный вариант сухих степей. В составе растительности, кроме полыни холодной, сохранились устойчивые к выпасу виды, такие как *Potentilla acaulis*, *P. multifida*, *Thymus baicalensis*, *Artemisia commutate*, *Oxytrpis oxuphilla*. В нижней части склона и его подножии формируются преимущественно крылово-ковыльные степи.

Почвы на всем протяжении склона каштановые. В приводораздельной части они характеризуются укороченностью профиля, супесчаным гранулометрическим составом с хрящем и щебнем. В подножии склона мощность гумусированной толщи возрастает до 25–35 см, а гранулометрический состав становится суглинистым, т.е. гранулометрический состав склоновых почв выстраивается в определенный парагенетический ряд [10].

В рамках морфометрической модели склоновой эрозии в общем виде объем смыва-размыва почв описывается уравнением [11]:

$$V = \int_0^l w dl, \quad (1)$$

где  $w$  – площадь поперечного сечения единичной формы деллей;  $l$  – ее длина.

Модель реализована определением объема деллевой сети. На склоне вкрест направлению временных водотоков закладывались параллельные друг другу трансекты длиной 100 м с учетом охвата основных элементов наклонной поверхности. Длина деллей принималась равной длине элементарной части склона. По каждой трансекте фиксировались все деллевые формы, измерялись расстояние между ними, ширина и глубина. Измерения на местности для последующих геометрических построений и определения объемных параметров деллей проводились методом высокоточной съемки с помощью геодезического GPS-приемника Trimble R3 и Garmin, электронного тахеометра Trimble M3.

Площадь поперечного сечения элементарной деллевой единицы определялась как для треугольника (2) или трапеции (3)

$$s = \frac{1}{2} a h, \quad (2)$$

$$s = \frac{1}{2} (a+b) h, \quad (3)$$

где  $a$  – ширина на поверхности, м;  $h$  – глубина, м; для трапециевидной формы  $b$  – ширина по дну, м.

По каждой трансекте площади поперечного сечения всех русел суммируются. Объем материала во всех зафиксированных деллях стока в пределах элементарного участка склона ( $j$ ) (или то же самое объем почвы, смытой с элементарного участка) равняется

$$V_j = L_j (s_1 + s_2 + s_3 \dots + s_n) \text{ (м}^3\text{)}, \quad (4)$$

где  $L_j$  – протяженность элементарного участка склона,  $s_1, s_2, s_3 \dots s_n$  – площади поперечных сечений всех деллей по учетной линии.

Для всего склона объем смытого в результате потерь почвенного материала по деллям

$$V_{\text{общ}} = \Sigma V_{1,2,3} \text{ (м}^3\text{)}. \quad (5)$$

Потеря почвы по массе при эрозии по деллям составит

$$П = V_{\text{общ}} \cdot \rho \cdot S \text{ (кг/м}^2\text{, т/га)}, \quad (6)$$

где  $V_{обц}$  – объем смытой почвы со всей изученной территории склона ( $m^3$ );  $\rho$  – плотность почвы ( $kg/m^3$ );  $S$  – площадь ( $m^2$ , га).

Условную энергию выполнения работы временными водотоками деллей определим, исходя из классической формулы энергии положения

$$W_n = m \cdot g \cdot h \text{ (Дж)}, \quad (7)$$

где  $m$  – масса перемещенного материала, кг;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $h$  – высота перемещения, м.

Комплексная характеристика топографических факторов ( $Q$ ) определяется по формуле

$$Q = LS, \quad (8)$$

где  $L$  – фактор длины склона;  $S$  – фактор крутизны склона.

Для прогноза эрозии роль уклона местности ( $I$ , %) Уишмейером и Смитом учитывается специальной формулой, которая в метрической системе СИ имеет вид [11–12]

$$S = 0,0650 + 0,0454I + 0,0065I^2. \quad (9)$$

Выражение для нормирования стока наносов на длину склона имеет вид

$$L = \left( \frac{x}{22,13} \right)^m, \quad (10)$$

где  $x$  – длина склона, м;  $m$  – эмпирический коэффициент, для нашего случая  $m = 0,5$ .

Уравнение (7) показывает потенциальную энергию тела, помещенного в гравитационном поле Земли на ту или иную высоту. Согласно закону сохранения, эта энергия обратно высвобождается в виде работы водных потоков. Нами условно принимается, что эта работа эквивалентно потенциальной энергии затрачивается на перемещение определенной массы почвенного материала вниз по склону, а уравнения (8), (9) и (10) носят эмпирический характер и справедливы, может быть, только для 2/3 восточной части США. Однако Дж. К. Митчел и Г. Д. Бубензер [13], обосновывая действительную универсальность «универсального уравнения потери почвы», членами которого являются ( $S$ ) и ( $L$ ), показывают, что оно применимо для общих оценок, долгосрочных прогнозов и планирования почвоохранных систем, что его результативность доказана и при экстраполяции на территории других континентов.

На наклонных поверхностях процессы эрозии и почвообразования протекают сингенетично и при ненарушенности почв взаимно компенсиру-

ваны, т.е. при нормальной эрозии (денудации) сколько сносится гумусированного материала, столько же воспроизводится [14]. Отсюда принимают, что предельно допустимые эрозионные потери почв (ПДЭП) – это величина потерь почвы в виде гумуса и мощности плодородного слоя при эрозии, которая соответствует скорости почвообразования, когда устанавливается нулевой баланс между потерями и самовозобновлением почвенного органического вещества, а почвы формируют полноразвитый морфогенетический профиль.

Для определения ПДЭП использована формула, исходящая из оптимизационной модели Швевса [11]

$$\text{ПДЭП} = \frac{\gamma \left[ \left( \text{Нг} \cdot \bar{\Gamma} \right)_{исх} - \left( \text{Нг} \cdot \bar{\Gamma} \right)_{\phi} \right]}{t_2 - t_1} \cdot \left( e^{-0,005t_1} - e^{-0,005t_2} \right), \quad (11)$$

где  $\gamma$  – плотность почвы,  $g/cm^3$ ;  $\left( \text{Нг} \cdot \bar{\Gamma} \right)_{исх}$  – мощность гумусового горизонта или расчетного слоя (см) исходная и содержание гумуса, %;  $\left( \text{Нг} \cdot \bar{\Gamma} \right)_{\phi}$  – то же фактическая на интересующий момент;  $t_2 - t_1$  – расчетный интервал времени.

Полученные данные по ПДЭП позволяют рассчитать так называемое характерное время функционирования почвы при данных темпах эрозионных потерь почвенного материала.

### Результаты исследования и их обсуждение

Форма склонов Забайкалья весьма разнообразна. Нами изучен средний по длине и сложный по форме склон (рис. 1), профиль которого относится к ступенчатому типу. По морфологическому строению склон делится на три элементарных участка: А – верхнесклоновый выпуклый крутой, В – средесклоновый выположенный вогнутый, С – нижнесклоновый выпуклый крутой. Эти части соотносятся примерно как 1 : 2 : 0,5 при общей длине склона  $L_{обц} = 269$  м, базе эрозии  $H_{обц} = 36$  м, общем уклоне местности  $V_{обц} = 36/269 = 0,13$  (13%), чему соответствует крутизна склона  $\alpha = \text{arc tg } 0,13 = 7^\circ 30'$ .

Верхнесклоновый участок (А) при относительно небольшой длине ( $L_A = 83$  м) при перепаде высот  $H_A = 18$  м и характеризуется большой крутизной (табл. 1), что способствует началу смыва и размыва почв. Этому же благоприятствует выпуклая форма. Исходя из гипсометрического положения можно полагать, что верхнесклоновый участок – донорная зона для «подвешенных» к ней участков. Постоянный расход материала вызывает постепенное подрезание данного участка, укорачивание и соответственно рост длины нижележащей части склона.

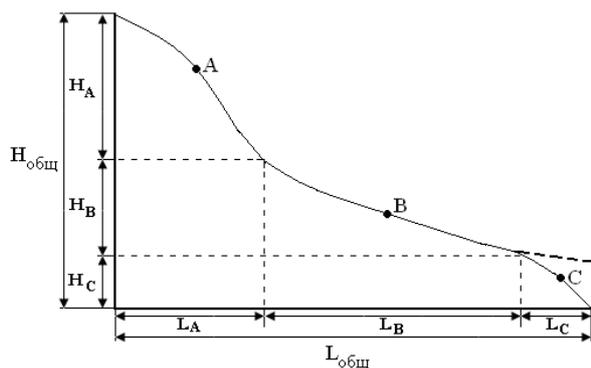


Рис. 1. Профиль изученного склона. Обозначения в тексте

Fig. 1. Profile of studied slope. Notations are in text

Средняя часть склона (В) – зона транзита. Поскольку крутизна остается довольно большой (около  $4,6^\circ = \text{ctg } 0,08^\circ$ ) и относительно велика длина этой части склона, то здесь создаются условия для развития достаточной гидродинамической силы потока и смыва почвы с последующим размывом и образованием деллей. Эта часть склона занимает наибольшую площадь.

В нижней части (С) крутизна склона вновь увеличивается. Эта часть склона укорочена, в связи с чем она занимает незначительную площадь.

Следует остановиться на этой части склона. При всем разнообразии склонов в Забайкалье наиболее часто встречаются профили, близкие к профилю равновесия, где средняя и нижняя части наиболее протяженные, все больше выпо-

лаживающиеся по мере удаления от водораздела (на рис. 1 показано штрихлинией). Известно, что даже на денудационных склонах образующиеся педименты (по Кингу) с маломощным чехлом рыхлых пород уже имеют вогнутый выположенный профиль. Образование уступа в данном случае вызвано деятельностью бессточного озера, которое оживает в дождливые годы. Тем самым нижнесклоновый уступ образовался в результате намокания и подмыва, а местами абразионного разрушения.

Различные части склона отличаются по параметрам эмпирических полигонов статистического распределения объема деллей (рис. 2).

Эмпирические полигоны распределения несут важную диагностирующую функцию. Верхний (А) и средний (В) участки склона характеризуются одномодальными кривыми статистического распределения. Это значит, что наибольшей ординате соответствует только одна наиболее вероятная величина объема деллей. Графически определяя модальные значения, можно заметить, что делли верхней части склона треугольной формы в поперечном сечении имеют заметно меньший объем, чем в средней части, где, как будет показано ниже, встречаемость деллей треугольной формы незначительна и резко преобладают делли трапецеидальной формы в поперечном сечении.

В нижней части склона объем деллей распределяется с двумя максимумами. Обычно при бимодальной кривой распределения считают

Т а б л и ц а 1

Морфометрические показатели модельного склона

Morphometric parameters of model slope

Элементарный участок склона	Продольная форма	Длина (L), м	Превышение (H), м	Уклон/крутизна		Изученная площадь, м <sup>2</sup>
				в долях единицы	градусы	
А	Выпуклая	83	18	0,217	12,2	8300
В	Вогнутая	145	12	0,080	4,6	14500
С	Прямая	41	6	0,146	8,3	4100

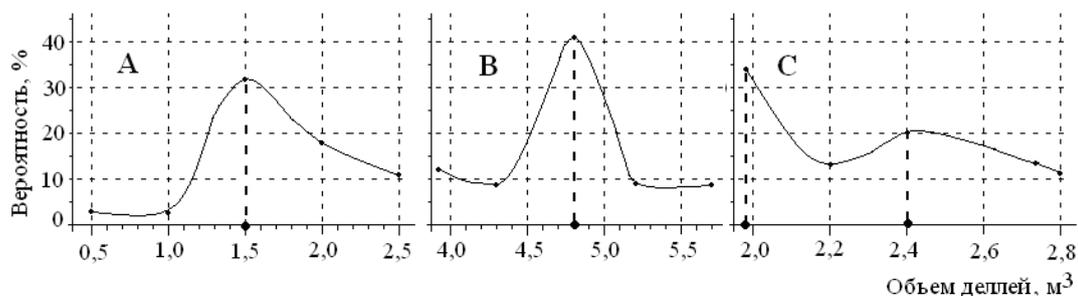


Рис. 2. Эмпирические полигоны распределения деллей по объему на различных участках модельного склона

Fig. 2. Empirical polygons of distribution of dells by volume in different parts of model slope

Показатели эрозии по деллям

Indicators of erosion by dells

Участок склона	Встречаемость деллей, %		Модальное значение объема деллей, м <sup>3</sup>	Удельная протяженность, м/м <sup>2</sup>	Суммарные потери почвы, м <sup>3</sup> /га / т/га	Условная работа, МДж / кг/га
	трапецидального сечения	треугольного сечения				
Верхний	23	77	1,5	0,11	12/18	3,2
Средний	76	24	4,8	0,16	33/43	5,1
Нижний	44	56	2,2*	0,18	201/221	13,0

\* Среднее из двух мод.

выборочную совокупность неоднородной. Впрочем, для проверки нулевой гипотезы по графику определим, что первый максимум имеет вероятность  $k_1 = 34\%$ , второй  $k_2 = 20\%$ , а промежуточный минимум  $k_3 = 13\%$ . Докажем, что минимум образовался статистически не случайно. Воспользовавшись методикой [15], определили, что критерий Стьюдента фактический превышает теоретическое значение  $t_{\phi} > t_m = 2,39 > 2,10$  при достаточном доверительном уровне  $P > 0,95$ . Тем самым нулевая гипотеза отвергается, выборочная совокупность распадается на две самостоятельные выборки. В нашем случае это означает, что две морфометрические разновидности деллей (треугольного и трапецидального сечений) в изученной выборке на этом участке представлены примерно в равных долях.

Действительно, в нижней части склона соотношение деллей трапецидального и треугольного сечений близко единице (табл. 2). При этом первая мода (1,9 м<sup>3</sup>) соответствует деллям треугольного сечения в профиле, а вторая (2,4 м<sup>3</sup>) – трапецидального.

В верхней части склона, являющегося донором материала, с наибольшей вероятностью встречаются делли относительно молодых генераций, имеющие треугольное поперечное сечение. Они характеризуются незначительным объемом с модальным значением 1,5 м<sup>3</sup>. Относительно длинная и пологая средняя часть склона гофрирована деллями преимущественно трапецидальной формы, которая предполагает большую вмещающую емкость. Получено, что здесь объем деллей по модальному значению достигает большой величины – 4,8 м<sup>3</sup>.

Удельная протяженность деллей, вычисленная по аналогии с коэффициентом расчлененности как  $K = l/S$  ( $l$  – длина сети деллей,  $S$  – площадь изученной территории), растет вниз по склону от 0,11 до 0,18 м/м<sup>2</sup>. В этом же направлении увеличивается смыв почвы как по объему, так и по массе.

Примечательно, что наивысшего напряжения эрозия по деллям достигает на коротком прямом

участке крутого уступа в нижней части склона. Несмотря на небольшое расстояние от базиса эрозии, энергетика смыва и размыва значительна и достигает 13 МДж/кг/га. Гипсометрически более высокие участки характеризуются относительно небольшим стоком наносов, соответственно невелика и энергетика процесса.

Максимальный смыв при эрозии по деллям наблюдается в конечном участке склона, где равняется 201 м<sup>3</sup>/га или 221 т/га. Для сравнения укажем, что в Молдавии объем размывтой почвы по микроложбинам сверху вниз по склону возрастает от 30 до 649 м<sup>3</sup>/га [16].

Прогнозные расчеты по уравнению Уишмейера-Смита показывают, что в верхней части склона потенциальные потери почв при размыве равняются 78, в средней – 13, в нижней – 30 т/га/год. Отсюда, зная общее количество потерь почвенного материала, определим средний возраст деллей, например, в середине склона 43/13 ~ 3 года, в нижней части склона время их жизни немногим превышает 7 лет (221/30).

Напомним, что нами использовалось «универсальное уравнение потери почвы» в усеченном виде лишь только в той части, где Уишмейером-Смитом выведена напрямую связь потери почвы (т/акр/год) с уклоном местности, куда введена поправка на длину склона. Несмотря на условность полученных временных показателей, в первом приближении они пригодны для оценок. Можно полагать, что столь длительная жизнь деллей объясняется установлением равновесного состояния между приходом и расходом наносов. Периоды оживления и размыва при интенсивных атмосферных осадках сменяются длительными периодами вялого течения воды, зарастания, задерновывания и аккумуляции материала. Дальнейшая судьба деллей – полное зарастание и трассирование деллей в других местах или катастрофический размыв и образование новых оврагов. Такое положение в теории диссипативных систем называется бифуркацией, т.е. состоянием крайней неопределенности динамической системы, находящейся на границе перехода в иное состояние даже при

малых изменениях ее параметров. Линейность процессов и динамики при бифуркации сменяется нелинейной динамикой, особенно в контурах обратной связи, результат которых заранее неизвестен. В периоды бифуркаций, как отмечают И.Пригожин, И.Стенгерс [17], первую роль начинают играть флуктуации, т.е. случайности. Детерминистические законы действуют только между бифуркациями. Тем самым делли, маркируя собой переломный момент, могут эволюционировать в сторону как затухания (самозасыпание, зарастание) и исчезновения, так и развития – оврагообразования.

Подход Уишмейера-Смита можно использовать при географических обобщениях эрозионного потенциала рельефа, применяя карту [18]. Значения ( $L$ ) определяем, зная степень расчлененности рельефа ( $K_{рч}$ ). Так, степень расчлененности котловин Забайкалья  $K_{рч} = 0,2-0,35$ , средняя расчлененность  $K_{рч} = 0,2+0,35/2 = 0,275$ .

Длина склонов в среднем будет равна

$$x = \frac{1}{2K_{рч}} = \frac{1}{2 \cdot 0,275} = 1818 \text{ м.}$$

Фактор длины склона

$$L = \left( \frac{x}{22,13} \right)^m,$$

где  $x$  – длина склона;  $m$ ,  $m$  – эмпирический коэффициент, который равен 0,5, если уклон  $> 5\%$ ; равен 0,4 при уклоне 3–5%; равен 0,3 при уклоне 1–3%; равен 0,2 при уклоне  $< 1\%$ .

$$L = \left( \frac{1818}{22,13} \right)^{0,3} = 3,75.$$

На той же карте в легенде указан средний уклон местности  $I_{cp} = 0,005-0,03$ . Тогда среднее значение  $I_{cp} = 0,005+0,03/2 = 0,0175 = 1,75\%$ .

Фактор крутизны склона

$$S = 0,0650 + 0,0454 \cdot 1,75 + 0,0065 \cdot 1,75^2 = 0,065 + 0,07945 + 0,0199 = 0,1644.$$

Топографический фактор эрозии в целом для котловин Забайкалья (эрозионный потенциал рельефа)

$$LS = 3,75 \cdot 0,16 = 0,6.$$

Существует также возможность графического определения показателя LS (рис. 3).

Эрозионный потенциал осадков (ЭПО)

ЭПО =  $0,2584 H I_{30} - 0,1492$ , где  $H$  – количество осадков, мм,  $I_{30}$  – максимальная интенсивность дождя за 30 мин. Определение ЭПО – трудоемкая операция, т.к. связано с анализом многочисленных плювиограмм станций региона за 15–20 лет. По схематической карте, составленной в МГУ, котловины Западного Забайкалья, куда не достигают тихоокеанские муссоны,

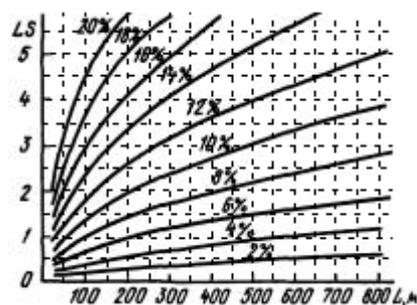


Рис. 3. Зависимость LS от уклона (%) и длины склона (L)

Fig. 3. Dependence LS on slope (%) and slope length (L)

характеризуются ЭПО, равным 4, 5, 6 единицам, за исключением Баргузинской, Муйско-Куандинской и Верхнеангарской котловин, где ЭПО ~ 3–4 единицам.

Для расчета ПДЭП в качестве исходных показателей выступало гумусное состояние каштановых почв в 50-е годы XX в., т.е. до начала целинной эпопеи в центральноазиатских степях,  $t_2 - t_1 \sim 60$  лет. Эти данные использовались при расчете кинетики содержания гумуса за XX в. [19]. Фактическое гумусное состояние принято равным среднеэродированным почвам. При этом полагаем, что именно эта категория земель еще способна удовлетворять потребностям растений.

Заметим, что в США, где еще в 30-х годах XX в. получила развитие концепция о допустимых потерях, этот показатель основывается на априорных утверждениях и экспертном подходе. Так, в зависимости от мощности почв допустимые потери при эрозии принимаются в пределах, т/га/год: менее 25 см – 2,2; 25–51 – 4,5; 51–102 – 6,7; 102–152 – 9,1; более 152 – 11,2.

Нашими расчетами показано, что в сухостепных ландшафтах Забайкалья

$$\text{ПДЭП} = \frac{1,2[(48 \cdot 1,7) - (33 \cdot 0,8)](0,995 - 0,7408)}{10}$$

$= 1,9 \sim 2$  т/га/год. Понятно, что скорость почвообразования также соответствует этой же величине. Здесь принято, что уже в первое десятилетие распаханые целинные почвы претерпевают сильнейший стресс. Резко усиливаются процессы ускоренной эрозии. Особенно неравновесные условия сложились на склонах. Скорости деструктивных процессов намного превосходили ресурсовоспроизводящие.

Масса ( $M$ ) 1-см слоя ( $H = 1$  см) при плотности почвы  $\gamma = 1,4$  г/см<sup>3</sup> составляет  $M = H$  (см)  $\cdot \gamma$  (г/см<sup>3</sup>)  $\cdot 100 = 140$  т/га. Отсюда определим массу горизонтов А+В мощностью 48 в исходном и критическом состояниях:

## ОБ ЭРОЗИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПО ДЕЛЛЯМ (НА ПРИМЕРЕ ЗАБАЙКАЛЬЯ)

$$M_{\text{исх}} = 48 \cdot 140 = 6720 \text{ т/га,}$$

$$M_{\text{кр}} = 14 \cdot 140 = 1960 \text{ т/га.}$$

Так же определим массу горизонтов в фактическом состоянии при тех или иных степенях эродированности и соответственно потерь профиля. Критическая мощность гор. А+В наступает, когда потеряно 70% и более от исходной.

В настоящее время в сухой степи Забайкалья в зависимости от уровня потерь почвенного профиля масса плодородных горизонтов колеблется от 3400 до 6000 т/га, уступая исходной мощности на 5–24 см (табл. 3). История эволюционных изменений в верхних слоях каштановых почв Забайкалья охватывает временной интервал в 600 лет (по  $T_1$ ). Особенно бурные изменения произошли за последние 60–70 лет, когда почвы деградировали до состояния высокой эродированности.

Т а б л и ц а 3

**Характерное время функционирования каштановых почв ( $T_1$ ,  $T_2$ , годы) в условиях Забайкалья**

**The characteristic time of functioning of chestnut soils ( $T_1$ ,  $T_2$ , years) in Transbaikal region**

Показатели	Уровни потерь почвенного профиля от исходной мощности		
	10%	30%	50%
	низкий	средний	высокий
$H_{\text{исх}}$ , см	48 (6720 т/га)		
$H_{\text{кр}}$ , см	14 (1960 т/га)		
$H_{\text{ф}}$ , см	43	34	24
$M_{\text{ф}}$ , т/га	6020	4760	3360
$\Delta H_1 = H_{\text{исх}} - H_{\text{ф}} = 48 - H_{\text{ф}}$ , см	5	14	24
$V_{\Delta 1} = (\Delta H_1 \cdot \gamma) / t \cdot 100$ , т/га/год	10	28	48
$T_1$ , годы	602	170	70
$\Delta H_2 = H_{\text{ф}} - H_{\text{кр}}$ , см	29	20	10
$M_2$ , т/га	4060	2800	1400
$V_{\Delta 2} = (\Delta H_2 \cdot \gamma) / t \cdot 100$ , т/га/год	67	47	23
$T_2$ , годы	60	59	61

Показатель  $T_2$  оценивает тот промежуток времени, когда почва в результате эксплуатации придет в полный упадок. Как видно, трагический финал может наступить уже через 60 лет, т.е. синхронно смене одного поколения человеческой популяции (единица так называемого эффективного поколения 45 лет).

### Заключение

В отличие от оврагов, образующихся при экстремальных гидрологических ситуациях, куда более широкое распространение имеют, на первый взгляд, малозаметные перманентные явления поверхностной (плоскостной) эрозии, в т.ч. по деллям – линейным углублениям глубиной до 0,5 м и периодом жизни более одного года,

образованным в результате концентрирования склоновых вод и по которым осуществляется временный сток. Поперечное сечение деллей имеет треугольную или трапецидальную форму и аппроксимируется соответствующими уравнениями площадей. В пределах одного элемента склона (верхняя, средняя, нижняя часть) обычно преобладают делли одной формы поперечного сечения (или треугольной, или трапецидальной), а равновероятный характер распространения маркируется бимодальной кривой статистического распределения. Построенные полигоны распределения послужили для установления модальных значений – наиболее вероятных объемов деллей в разных частях склона.

Суммарные потери почвы резко возрастают сверху вниз по склону от 12 м<sup>3</sup>/га (18 т/га) до 201 м<sup>3</sup>/га (221 т/га). При этом энергия положения, интерпретируемая как работа, совершаемая водным потоком по перемещению вещества, изменяется от 3,2 до 13 МДж/кг/га. Расчеты по формуле Уишмейера и Смита в сопоставлении с натурными данными позволили установить, что время жизни деллей исчисляется 3–7 годами. Подход Уишмейера-Смита можно использовать для широких географических обобщений эрозионного потенциала на основании данных морфометрии рельефа.

Расчеты характерного времени функционирования (долговечности) каштановых почв показали, что из выявленных 600 лет эволюционного развития почвенного профиля последние шесть–семь десятилетий характеризуются агрогенной деградацией, знаменующей резким усилением ускоренной эрозии. При этом естественное воспроизводство почвенных ресурсов, может быть в какой-то степени и подстегнутое агрогенезом, не поспевало (и сейчас не поспевает) за деструктивными процессами.

### Литература

1. *Паракишина Э.М.* Проблемы диагностики и классификации эродированных и эродированных равнинных почв // Изучение, освоение и использование почв Сибири. Новосибирск, 2008. С. 246–256.
2. *Чалов Р.С., Чернов А.В.* Экстремальные проявления овражной эрозии и русловых процессов // Экстремальные гидрологические ситуации. М., 2010. С. 340–360.
3. *Геологический словарь.* М., 1978. Т. 1. 486 с.
4. *Баженова О.И., Любцова Е.М., Рыжов Ю.В., Макаров С.А.* Пространственно-временной анализ динамики эрозионных процессов на юге Восточной Сибири. Новосибирск: Наука, 1997. 203 с.
5. *Ковалева С.Р.* Характеристика эрозионно-опасных земель южного мегасклона хребта Ха-

мар-Дабан // Свойства почв таежной и лесостепной зон Сибири. Новосибирск: Наука, 1978. С. 50–63.

6. Краснощекоев Ю.Н. Почвозащитная роль горных лесов бассейна озера Байкал. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 223 с.

7. Краснощекоев Ю.Н., Горбачев В.Н. Лесные почвы бассейна оз. Байкал. Новосибирск: Наука, 1987. 145 с.

8. Реймхе В.В. Эрозионные процессы в лесостепных ландшафтах Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1986. 121 с.

9. Тармаев В.А., Корсунов В.М., Куликов А.И. Линейная эрозия в Байкальском регионе. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2004. 163 с.

10. Симонов Ю.Г. Региональный геоморфологический анализ (на примере Забайкалья). М.: Изд-во МГУ, 1972. 251 с.

11. Швец. Теоретические основы эрозиоведения. Киев; Одесса, 1981. 222 с.

12. Кузнецов М.С., Глазунов Г.П. Эрозия и охрана почв. М.: Изд-во МГУ, 2004. 351 с.

13. Эрозия почвы / Под ред. В.Дж.Киркби и Р.П.К.Моргана. М.: Колос, 1984. 415 с.

14. Лисецкий Ф.Н., Маринина О.А. Ресурсы и эрозионные потери почв // Сельскохозяйственные науки. 2011. № 11. С. 59–65.

15. Лутков Р.И., Бондаренко В.Н. Математические модели зависимости геологических объектов. М.: Наука, 1989. 121 с.

16. Петров Ю.П. Исследование микроложбинной эрозии на пахотных склонах юга Молдавии // Методы исследования водной эрозии почв. Кишинев, 1976. С. 191–196.

17. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. М., 2001. 310 с.

18. Атлас Забайкалья. М.; Иркутск, 1967. 176 с.

19. Куликов А.И., Абгалдаев Ю.В., Чимитдоржиева Г.Д. Изменение содержания гумуса при сельскохозяйственном использовании сухостепных почв Забайкалья // Почвоведение. 1992. № 5. С. 43–48.

### References

1. Parakshina E.M. Problemy diagnostiki i klassifikatsii erodiruemykh i erodirovannykh ravninykh pochv // Izucheniye, osvoeniye i ispol'zovaniye pochv Sibiri. Novosibirsk, 2008. P. 246–256.

2. Chalov R.S., Chernov A.V. Ekstremal'nye proyavleniya ovrazhnoy erozii i ruslovykh protsessov // Ekstremal'nye gidrologicheskie situatsii. M., 2010. P. 340–360.

3. *Geologicheskij slovar'*. M., 1978. V. 1. 486 p.

4. Bazhenova O.I., Lyubitsova E.M., Ryzhov Yu.V., Makarov S.A. Prostranstvenno-vremennoj analiz dinamiki erozionnykh protsessov na yuge Vostochnoj Sibiri. Novosibirsk: Nauka, 1997. 203 p.

5. Kovaleva S.R. Kharakteristika erozionno-opasnykh zemel' yuzhnogo megasklona khrebt Khamar-Daban // Svoystva pochv taezhnoj i lesostepnoj zon Sibiri. Novosibirsk: Nauka, 1978. P. 50–63.

6. Krasnoschekov Yu.N. Pochvozaschitnaya rol' gornykh lesov bassejna ozera Bajkal. Novosibirsk: Izd. SO RAN, 2004. 223 p.

7. Krasnoschekov Yu.N., Gorbachev V.N. Lesnye pochvy bassejna oz. Bajkal. Novosibirsk: Nauka, 1987. 145 p.

8. Rejmke V.V. Erozionnye protsessy v lesostepnykh landshaftakh Zabajkal'ya. Novosibirsk: Nauka, 1986. 121 p.

9. Tarmaev V.A., Korsunov V.M., Kulikov A.I. Linejnaya eroziya v Bajkal'skom regione. Ulan-Ude: Izd. BNTs SO RAN, 2004. 163 p.

10. Simonov Yu.G. Regional'nyj geomorfologicheskij analiz (na primere Zabajkal'ya). M.: Izd. MGU, 1972. 251 p.

11. Shvebs Teoreticheskie osnovy eroziovedeniya. Kiev; Odessa, 1981. 222 p.

12. Kuznetsov M.S., Glazunov G.P. Eroziya i okhrana pochv. M.: Izd. MGU, 2004. 351 p.

13. Eroziya pochvy / Pod red. V.Dzh. Kirkbi i R.P.K.Morgana. M.: Kolos, 1984. 415 p.

14. Lisetskij F.N., Marinina O.A. Resursy i erozionnye poteri pochv // Sel'skokhozyajstvennyye nauki. 2011. № 11. P. 59–65.

15. Lutkov R.I., Bondarenko V.N. Matematicheskie modeli zavisimosti geologicheskikh ob'ektov. M.: Nauka, 1989. 121 p.

16. Petrov Yu.P. Issledovanie mikrolozhbinnoj erozii na pakhotnykh sklonakh yuga Moldavii // Metody issledovaniya vodnoj erozii pochv. Kishinev, 1976. P. 191–196.

17. Prigozhin I., Stengers I. Poryadok iz khaosa. Novyj dialog cheloveka s prirodoy. M., 2001. 310 p.

18. Атлас Забайкалья. М.; Иркутск, 1967. 176 п.

19. Kulikov A.I., Abgaldaev Yu.V., Chimitdorzhieva G.D. Izmeneniye sodержaniya gumusa pri sel'skokhozyajstvennom ispol'zovanii sukhostepnykh pochv Zabajkal'ya // Pochvovedeniye. 1992. № 5. P.43–48.

Поступила в редакцию 31.05.2018

*Об авторах*

КУЛИКОВ Анатолий Иннокентьевич, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, <http://orcid.org/0000-0002-1826-4157>, [kul-an52@mail.ru](mailto:kul-an52@mail.ru);

УБУГУНОВ Леонид Лазаревич, доктор биологических наук, профессор, директор, Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, <http://orcid.org/0000-0002-1725-9460>, [ioeb@biol.bsnet.ru](mailto:ioeb@biol.bsnet.ru);

МАНГАТАЕВ Александр Цыренович, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник, Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, <http://orcid.org/0000-0002-3646-3141>, [aleksandr\\_man@mail.ru](mailto:aleksandr_man@mail.ru);

АХУНЗЯНОВА София Алимжановна, ассистент, Институт землеустройства, кадастра и мелиорации, Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова, 670034, Улан-Удэ, ул. Пушкина, 8, <http://orcid.org/0000-0002-9423-7353>, [ilnyr1307@mail.ru](mailto:ilnyr1307@mail.ru);

ПИГРОВА Тамара Михайловна, ассистент, Институт землеустройства, кадастра и мелиорации, Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова, 670034, Улан-Удэ, ул. Пушкина, 8, <http://orcid.org/0000-0002-1436-9613>, [missisx11@yandex.ru](mailto:missisx11@yandex.ru);

УСОЛЬЦЕВА Татьяна Сергеевна, ассистент, Институт землеустройства, кадастра и мелиорации, Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова, 670034, Улан-Удэ, ул. Пушкина, 8, <http://orcid.org/0000-0002-9971-3216>, [tati2991potemkina@mail.ru](mailto:tati2991potemkina@mail.ru).

*About the Authors*

KULIKOV Anatolii Innokent'evich, Doctor of Biological Sciences, Professor, Chief Research Scientist, Institute of General and Experimental SB RAS, 6, Sakh'yanova St., Ulan-Ude, 670047, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-1826-4157>, [kul-an52@mail.ru](mailto:kul-an52@mail.ru);

UBUGUNOV Leonid Lazarevich, Doctor of Biological Sciences, Professor, Director, Institute of General and Experimental SB RAS, 6, Sakh'yanova St., Ulan-Ude, 670047, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-1725-9460>, [ioeb@biol.bsnet.ru](mailto:ioeb@biol.bsnet.ru);

MANGATAEV Aleksandr Tsyrenovich, Candidate of Biological Sciences, Junior Researcher, Institute of General and Experimental SB RAS, 6, Sakh'yanova St., Ulan-Ude, 670047, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-3646-3141>, [aleksandr\\_man@mail.ru](mailto:aleksandr_man@mail.ru);

AKHUNZYANOVA Sofiya Alimzhanovna, Assistant, Institute of Land Management, Cadastre and Land Reclamation, V.R. Philippov Buryat State Agricultural Academy, 8 Pushkin St., Ulan-Ude, 670034, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-9423-7353>, [ilnyr1307@mail.ru](mailto:ilnyr1307@mail.ru);

PIGROVA Tamara Mikhajlovna, Assistant, V.R. Philippov Buryat State Agricultural Academy, 8 Pushkin St., Ulan-Ude, 670034, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-1436-9613>, [missisx11@yandex.ru](mailto:missisx11@yandex.ru);

USOLTSEVA Tatiana Sergeevna, Assistant, V.R. Philippov Buryat State Agricultural Academy, 8 Pushkin St., Ulan-Ude, 670034, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-9971-3216>, [tati2991potemkina@mail.ru](mailto:tati2991potemkina@mail.ru).