

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 911.9; 551.4.012; 551.4.042; 551.4.08

А.Ю. Сидорчук¹

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОЦЕНКИ ОВРАЖНОГО ПОТЕНЦИАЛА

Предложен экспресс-метод оценки овражного потенциала, основанный на учете критических характеристик потока, при которых начинается линейный размыв грунта. Новизна предложенного подхода заключается в переходе от расчета критической скорости потока к расчету критического слоя стока, при котором реализуется такая скорость. Все величины, необходимые для расчета критического слоя стока и уровня овражного потенциала как нормированной разности максимального слоя стока и его критической величины, вполне определены и могут быть рассчитаны и/или определены по данным наблюдений. Метод легко и быстро реализуется в среде любой географической информационной системы; на выходе получаются схема распределения уровня овражного потенциала по территории (водосбору) и степень риска развития овражной эрозии для территории (водосбора) в целом. Сравнение результатов оценки уровня овражного потенциала экспресс-методом с данными расчетов овражной эрозии с помощью детальной динамической модели показало вполне удовлетворительное их соответствие. Это подтверждает применимость экспресс-метода для быстрой оценки возможности использования тех или иных территорий для освоения и риска нарушения ландшафтов при естественных процессах овражной эрозии.

Ключевые слова: овражная эрозия; критический слой стока; полуостров Ямал

Введение. Овражная эрозия была и остается одним из наиболее разрушительных видов эрозионных процессов. Если на сельскохозяйственных землях в РФ она в настоящее время в целом идет на убыль [Гафуров и др., 2018], то в пределах поселений и территорий новейшего техногенного освоения овражная эрозия, наоборот, увеличивается [Григорьев и др., 2016]. Это особенно заметно в условиях Арктики, где сочетание легко размываемых грунтов и неустойчивого растительного покрова приводит к возникновению как естественных, так и техногенных оврагов [Познанин, 2012; Sidorchuk, 2015].

Наиболее достоверные оценки потенциала овражной эрозии получаются при прямом расчете трансформации продольных профилей всех возможных линейных эрозионных форм с помощью той или иной динамической модели овражной эрозии для всех расходов воды на данном водосборе в течение характерного времени развития оврага. Этот метод, единственно верный при детальных проектных работах на конкретном водосборе, требует большого количества исходных данных и калибровки модели [Сидорчук, 1998а, 2020]. Для предварительной оценки овражного потенциала на большой территории, намеченной для последующего освоения, такой подход является избыточным.

Имеется значительное количество несложных методов оценки овражного потенциала некоторой территории. Большинство их базируется на оценках «критических скоростей начала размыва» в отечественной литературе [Мирицхулава, 1970; Зорина, 1979] или «геоморфологических пороговых величин»

в литературе международной [Schumm, 1979]. Главным недостатком этих подходов является необходимость назначения некоторого особого расхода воды в овражной системе, для которого и рассчитывается критическая скорость начала размыва или пороговые величины уклона и площади водосбора. Так, например, в методе Е.Ф. Зориной [1979] предельная длина овражной формы L равна

$$L = 0,28 \left(\frac{d}{W} \right)^{0,67} \frac{HQ^{0,67}}{n^2 U_{cr}^{2,67}}. \quad (1)$$

Здесь H – глубина базиса эрозии, Q – формирующий расход воды, n – коэффициент шероховатости Маннинга, U_{cr} – критическая неразмывающая скорость, d и W – глубина и ширина потока в овраге.

Для расчета предельной длины овражной формы, как и входящих в формулу (1) морфометрических характеристик и критической скорости начала размыва, необходимо назначить расчетный расход воды. Желательно, чтобы результаты расчета при таком расходе воды были эквивалентны расчетам для всех расходов, формирующих овраг. Выбор эквивалентного расхода необходимо обосновать, что часто не делается. Для такого обоснования [Маккавеев, 1955; Wolman, Miller, 1960; Сидорчук, 1998б] требуются детальные сведения о гидрологическом режиме на водосборе.

Необходим такой экспресс-метод оценки, у которого не было бы указанных выше недостатков. В статье предлагается и обосновывается новый метод, а также приводится пример его применения для овражно-балочного водосбора на Бованенковском

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, вед. науч. с., докт. геогр. н.; e-mail: fluvial05@gmail.com

газоконденсатном месторождении (ГКМ) на полуострове Ямал.

Метод. Основой предлагаемого нового метода является переход от критической скорости начала линейного размыва к критической величине слоя стока, при превышении которой начинается размыв. Запишем критическую скорость потока U_{cr} по формуле Шези-Маннинга через уклон S , глубину d и коэффициент шероховатости n :

$$U_{cr} = \frac{\sqrt{S}}{n} d^{2/3}. \quad (2)$$

Если с помощью гидравлико-морфометрической зависимости заменить в ней глубину потока d степенной функцией от расхода воды Q (т.е. произведением слоя стока M на площадь водосбора F в данной точке $Q=kMF$):

$$d = pQ^m, \quad (3)$$

то получим

$$U_{cr} = \frac{\sqrt{S}}{n} (pQ^m)^{2/3} = \frac{\sqrt{S}}{n} p^{2/3} (kMF)^{2m/3}. \quad (4)$$

Здесь $k = 1/84600000$ – переходный коэффициент от размерности расхода воды ($\text{м}^3/\text{с}$) к размерности слоя стока (мм) при выражении площади водосбора в м^2 ; p и m – коэффициент и показатель степени в морфометрической зависимости (3). Для применения формулы (4), например, для расчетов по формуле (1), требуется задать расчетный расход воды или слой стока, в общем случае неизвестный. Для того, чтобы избавиться от этой неопределенности, достаточно решить формулу (4) относительно слоя стока:

$$M_{cr}^{2m/3} = \frac{nU_{cr}}{\sqrt{S_{cr}} p^{2/3} (kF)^{2m/3}}. \quad (5)$$

Формула (5) означает, что если наблюдаемый слой стока M превышает рассчитанное критическое значение M_{cr} , то в данном пункте на водосборе возможен линейный размыв. Если наблюдаемый максимальный для данной территории слой стока не превышает рассчитанного критического, эрозийный размыв происходить не будет. Размыв будет тем существеннее, чем больше разность между максимальной для данной территории величиной $M_{\max}^{2m/3}$ и критическим значением $M_{cr}^{2m/3}$. Эту разность в данном пункте, приведенную к $M_{\max}^{2m/3}$, назовем уровнем овражного потенциала R_U

$$RU = \frac{M_{\max}^{2m/3} - M_{cr}^{2m/3}}{M_{\max}^{2m/3}}. \quad (6)$$

Отношение числа расчетных пунктов (пикселей) с положительной величиной эрозии $N_{RU>0}$ к общему числу N расчетных пунктов (пикселей) характеризует степень риска развития овражной эрозии R .

Необходимые величины для расчета R_U и R обычно доступны. Максимальный суточный слой стока для данной территории или водосбора $M_{\max}$

есть величина вполне определенная и может быть получена или по наблюдениям, или по гидрологической модели. Площадь водосбора и уклон в данном пункте получаются с топографической карты или из цифровой модели рельефа. Коэффициент шероховатости n для потоков на склонах или в оврагах необходимо установить из наблюдений, как и коэффициенты p и m . При отсутствии наблюдений эти параметры подбираются из опубликованных [Park, 1977] для близких условий. Критическая скорость начала размыва рассчитывается по известным формулам [Мирицхулава, 1970; Кузнецов, 1981; Sidorchuk, Grigor'ev, 1998] исходя из литологии размываемых грунтов и свойств растительного покрова.

Результаты. Расчеты овражного потенциала проведены для одного из участков Бованенковского ГКМ. Это водосбор балки площадью $1,14 \text{ км}^2$ с естественными и техногенными оврагами, на котором расположен поселок Передвижная база бурения (ПББ). Здесь в 1990–1997 гг. были проведены измерения стока воды, морфометрических характеристик склоновых потоков и темпов эрозии [Бобровицкая и др., 1999; Sidorchuk, 2015]. Имеются также режимные наблюдения на метеостанции Марресале [Булыгина и др., 2009] и данные экспедиционных измерений стока воды в 1986–1990 гг. на стационаре Государственного гидрологического института Северный [Гидрология ..., 2009]. Исходя из этих исследований, параметры в формулах (5) и (6) имеют значения: $m=0,3$; $p=0,21$; $n=0,06$; $M_{\max}=62 \text{ мм}$ (раз в 100 лет). В результате формула (5) приобретает вид

$$M_{cr}^{0,2} = \frac{6,57U_{cr}}{\sqrt{S_{cr}} F_{cr}^{0,2}}, \quad (7)$$

а формула (6) –

$$R_U = 1 - \frac{2,88U_{cr}}{\sqrt{S_{cr}} F_{cr}^{0,2}}. \quad (8)$$

Критическая скорость начала размыва для выбранного участка устанавливалась в ходе полевых экспериментов для разных литологических разностей грунтов и состояния растительного покрова, для которого в данном случае основной характеристикой является объем подземной биомассы (тонких корней) в поверхностном слое грунта [Sidorchuk, Grigor'ev, 1998]. Контрольные расчеты проведены для значений $U_{cr}=0,2 \text{ м/с}$ (суглинистые грунты с полностью нарушенным растительным покровом) и $U_{cr}=0,5 \text{ м/с}$ (суглинистые грунты под естественным мелкокустарничковым растительным покровом).

Расчеты по формуле (8) проведены с помощью модулей географической информационной системы QGIS [QGIS ..., 2019]. Цифровая модель рельефа для участка Бованенковского ГКМ извлечена из большой цифровой модели рельефа Арктики ArcticDEM [2018] с горизонтальным разрешением 2 м. Площади водосбора рассчитаны в модуле ГИС SAGA Terrain Analysis – Hydrology – Catchment area, а уклоны –

Terrain Analysis – Morphometry – Slope, aspect, curvature – 9 parameter 2nd order polynomial – [0]radians. Распределение R_U по площади получено в калькуляторе растров. Векторизация этого растра (модуль Vector ↔ raster – Raster values to points) позволяет получить таблицу атрибутов, установить количество пикселей с $R_U > 0$ и вычислить степень риска развития овражной эрозии R . Эти процедуры занимают несколько минут, так что предложенный метод реализуется в среде QGIS очень быстро. Используемые для расчетов модули входят в любую географическую информационную систему, так что экс-пресс-метод может быть реализован в любой удобной для пользователя оболочке.

Значение $U_{cr} = 0,2$ м/с соответствует суглинистым грунтам с полностью нарушенным растительным покровом. Такие условия характерны для тех участков водосбора балки, где произошло нарушение растительного покрова как при техногенном воздействии (при строительстве и движении транспорта), так и в результате естественных склоновых процессов – быстрых сплывов. Таким образом, на рис. 1 показан максимально возможный потенциал (риск) процессов линейного размыва для данного водосбора. Степень риска развития овражной эрозии R составляет 0,17. Уровень овражного потенциала R_U максимален на крутых склонах балки и речной долины, в вершинах большинства оврагов. На этих же участках максимальна вероятность схождения быстрых сплы-

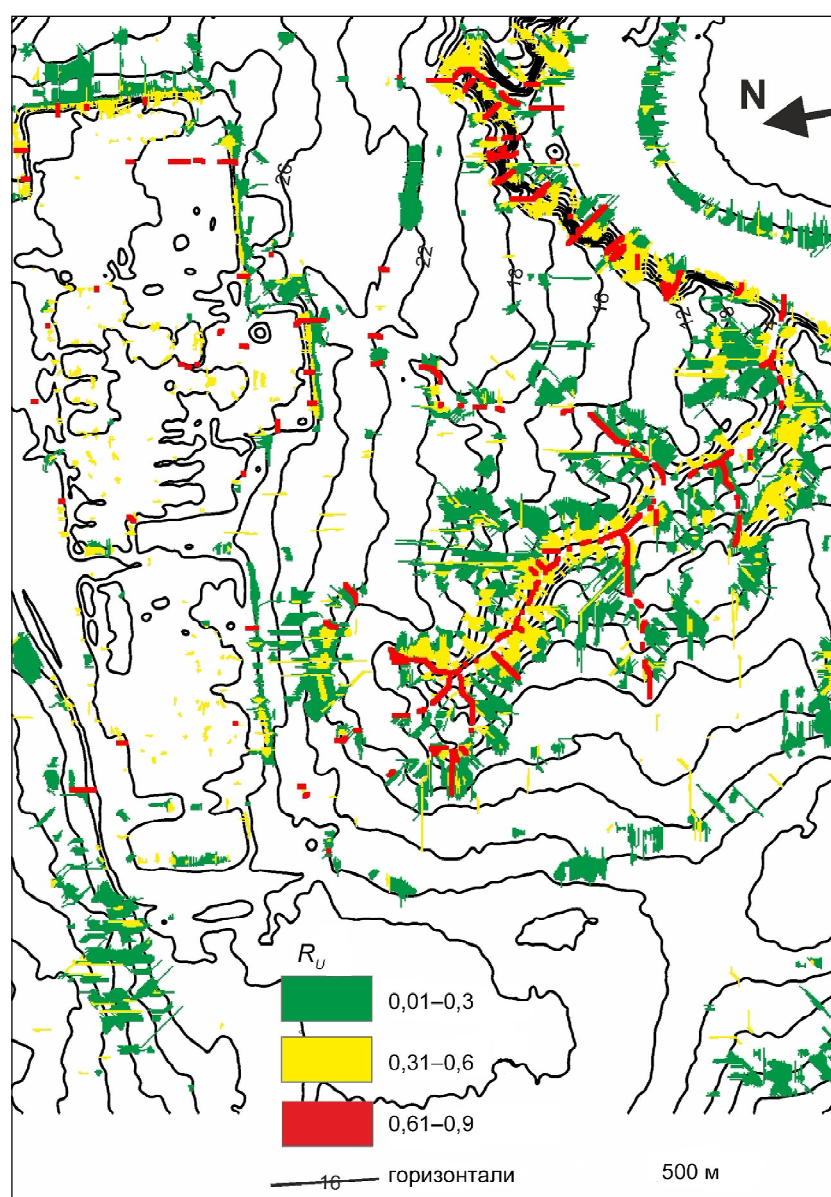


Рис. 1. Распределение уровня овражного потенциала R_U на водосборе балки на Бованенковском ГКМ, рассчитанного при критической скорости начала размыва $U_{cr} = 0,2$ м/с. Белый фон соответствует отрицательным значениям R_U

Fig. 1. Distribution of the gully erosion potential R_U at the catchment within the Bovanenkovo gas condensate field calculated for the critical velocity of erosion initiation $U_{cr} = 0,2$ m/s. White background corresponds to negative R_U values

вов [Воскресенский, 2001; Лейбман, Кизяков, 2007], так что принятое значение $U_{cr} = 0,2$ м/с полностью соответствует реальной обстановке. Также на рис. 1 выделяются края песчаной площадки, на которой расположен поселок ПББ, где полевые наблюдения выявляют многочисленные линейные размывы.

Значение $U_{cr} = 0,5$ м/с соответствует суглинистым грунтам с ненарушенным растительным покровом. Это идеальные условия, которые не реализуются даже при полном отсутствии техногенного воздействия на ландшафт из-за естественных процессов нарушения целостности верхнего слоя грунта. В этих условиях значение R составляет 0,004. Тем не менее, даже при расчетах для идеальных условий не-

нарушенного растительного покрова в пределах основных эрозионных форм – в балке и в части оврагов – имеются участки с положительным овражным потенциалом (рис. 2).

Гистограммы положительных уровней овражного потенциала R_U (рис. 3) описываются функциями, близкими к экспоненциальной. Наибольшую повторяемость имеют малые значения R_U ; с его увеличением повторяемость быстро уменьшается. Такое распределение R_U по частотам указывает в целом на благоприятные условия для освоения водосбора, на котором расположен поселок ПББ. Это подтверждается отсутствием серьезных угроз функционированию всех служб ПББ за более чем 30 лет

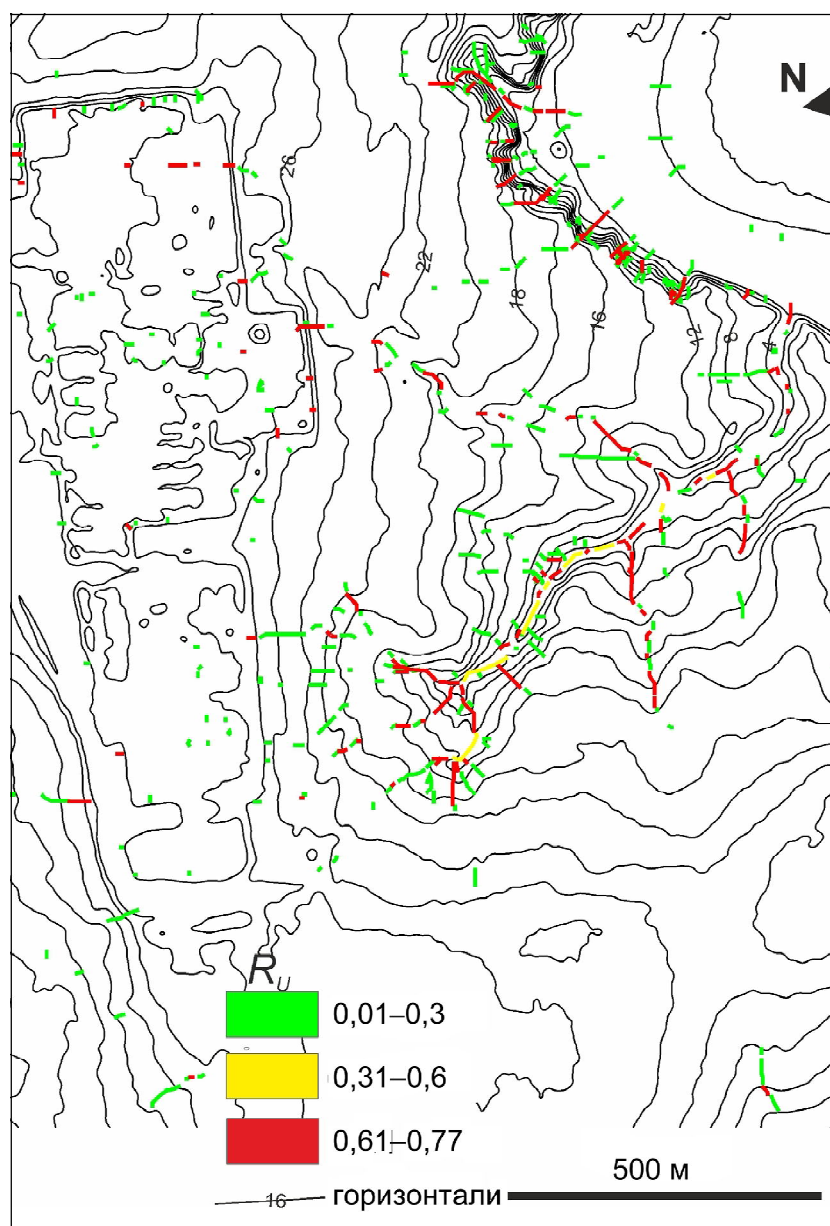


Рис. 2. Распределение уровня овражного потенциала R_U на водосборе балки на Бованенковском ГКМ, рассчитанного при критической скорости начала размыва $U_{cr} = 0,5$ м/с

Fig. 2. Distribution of the gully erosion potential R_U at the catchment within the Bovanenkovo gas condensate field calculated for the critical velocity of erosion initiation $U_{cr} = 0,5$ м/с

его существования [Sidorchuk, 2015]. Тем не менее, овраг Антропогенный подходит к самой площадке поселка. В его вершине выявляется риск высокой овражной эрозии как при критической скорости начала размыва 0,2 м/с, так и, что особенно важно, при $U_{cr}=0,5$ м/с, то есть даже при ненарушенном почвенно-растительном покрове (рис. 4).

Обсуждение результатов. Для балки на Бованенковском ГKM были проведены расчеты глубины эрозионного вреза по всем линиям тока на водосборе с помощью полной динамической модели овражной эрозии и термоэрозии GULTEM [Сидорчук, 2020]. Можно сравнить результаты расчета величин эрозии по полной модели с оценками уровня овражного потенциала с помощью предлагаемого экспресс-метода по тем же линиям тока для положительных значений R_U (рис. 5). Для каждой отдельной линии тока имеется вполне удовлетворительная связь рассчитанных глубин эрозионного вреза Δh и величин уровня овражного потенциала R_U , которая описывается экспоненциальной функцией

$$\Delta h = a \exp(bR_U). \quad (9)$$

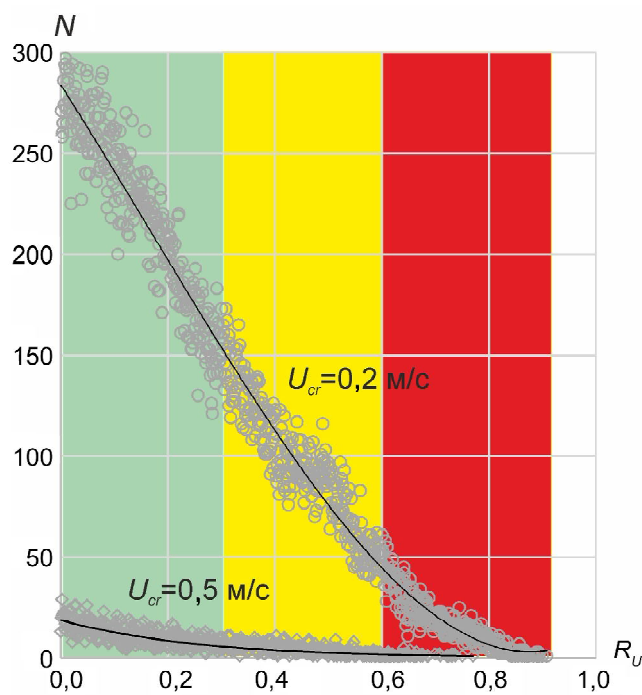


Рис. 3. Гистограммы ненулевого уровня овражного потенциала R_U на водосборе балки на Бованенковском ГKM для разных критических скоростей начала размыва U_{cr} . N – число пикселей с ненулевым R_U в столбце гистограммы с интервалом 0,01

Fig. 3. Histograms of positive gully erosion potential R_U at the catchment within the Bovanenkovo gas condensate field for different critical velocities of erosion initiation U_{cr} . N is the number of pixels with positive R_U in the histogram column with 0,01 interval

Коэффициент b варьирует в довольно узких пределах 3,4–3,5, а коэффициент a изменяется от 0,017 до 0,045 для разных линий тока, определяя ширину полосы разброса для всех данных. Главной причиной того, что для разных линий тока зависимость (9) не совпадает по коэффициентам, является меньшее число факторов эрозии, которое учитывается в экспресс-методе по сравнению с полной моделью. В полной модели расчет трансформации продольного профиля оврага проводится для всей линии тока, учитывается положение базиса эрозии и изменение уклонов потока по его длине. Глубины вреза изменяются также в результате оползания материала со склонов оврага. В экспресс-методе учтены только местные уклон и площадь водосбора в данном пункте, а склоновые процессы вообще не принимаются во внимание.

Ширина полосы разброса значений R_U составляет 0,3 (см. рис. 5). Поэтому целесообразно использовать для классификации и картографирования уровня овражного потенциала три градации R_U : 0,01–0,3; 0,31–0,6 и 0,61–1, соответствующие слабому, среднему и высокому уровням.

Выводы:

- предложен экспресс-метод оценки овражного потенциала, основанный на традиционном учете пороговых величин в трансформации ландшафта, в данном случае, критических характеристик потока, при которых начинается линейный размыв грунта;
- новизна предложенного подхода заключается в переходе от расчета критической скорости потока (формула 2) к расчету критического слоя стока, при котором реализуется такая скорость (формула 5). В этом случае исчезает неопределенность, которая существует при выборе условий для расчета по формуле 2;
- все величины, необходимые для расчета критического слоя стока (формула 5) и нормированной разности максимального слоя стока и его критической величины (формула 6), вполне определены и могут быть рассчитаны и/или получены по данным наблюдений;
- метод легко и быстро реализуется в среде любой географической информационной системы; на выходе получают схему распределения уровня овражного потенциала по территории (водосбору) и степень риска развития овражной эрозии для всей территории;
- сравнение результатов оценки овражного потенциала экспресс-методом с данными расчетов овражной эрозии с помощью детальной динамической модели показало их вполне удовлетворительное соответствие. Это означает возможность применения метода для быстрой оценки перспектив использования тех или иных территорий для освоения и рисков нарушения ландшафтов при естественных процессах овражной эрозии.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 18-05-60147).

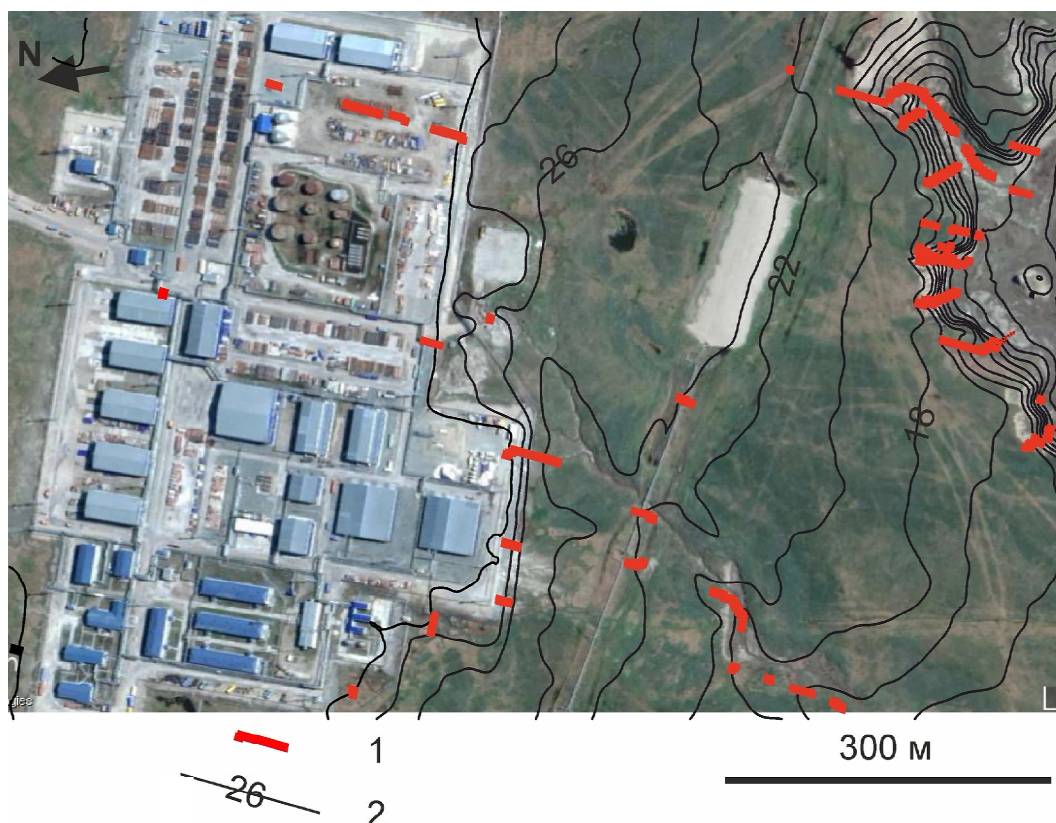


Рис. 4. Изображение площадки поселка ПББ и вершин оврага Антропогенный на снимке GOOGLE EARTH от 27 июня 2016 г. с областями рассчитанного высокого риска овражной эрозии при $U_{cr} = 0,5$ м/с (1). Также показаны горизонталы рельефа (2)

Fig. 4. The site of the PBB settlement and the heads of Antropogeniy gully on the GOOGLE EARTH image of June 27, 2016, with areas of the calculated high risk of gully erosion at $U_{cr} = 0,5$ m/s (1). The relief contours are also shown (2)

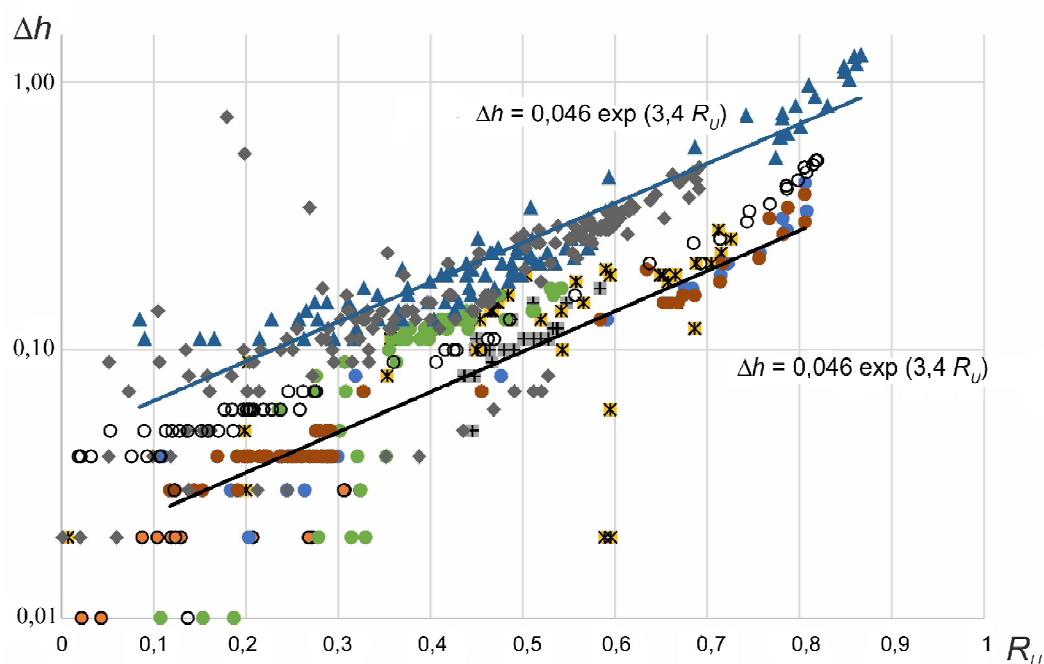


Рис. 5. Связь между значениями уровня овражного потенциала R_U , рассчитанными по экспресс-модели (формула 8), и величинами глубины овражного вреза Δh , полученными с помощью полной динамической модели овражной эрозии и термоэрозии GULTEM вдоль тех же линий тока

Fig. 5. The relationship between the values of gully erosion potential R_U calculated by the express model (formula 8) and the values of gully depth Δh obtained using the GULTEM dynamic model of gully erosion and thermal erosion along the same flow lines

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бобровицкая Н.Н., Баранов А.В., Василенко М.Н., Зубкова К.М. Сток воды и наносов на овражных водосборах // Эрозионные процессы центрального Ямала / Под ред. А.Ю. Сидорчука и А.В. Баранова. СПб: РНИИ Культурного и природного наследия, 1999. С. 90–105.
- Воскресенский К.С. Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России. М.: Изд-во МГУ, 2001. 240 с.
- Гафуров А.М., Рысин И.И., Голосов В.Н., Григорьев И.И., Шарифуллин А.Г. Оценка современного роста вершин оврагов южного мегасклона Восточно-Европейской равнины с применением набора инструментальных методов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 5. С. 61–68.
- Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / Под ред. С.М. Новикова. СПб.: ВВМ, 2009. 536 с.
- Григорьев И.И., Ковалев С.Н., Рысин И.И. Техногенные овраги // Геоморфология. 2016. № 2. С. 27–33.
- Зорина Е.Ф. Расчетные методы определения потенциала овражной эрозии // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 7. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. С. 81–90.
- Кузнецов М.С. Противоэрозионная стойкость почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 136 с.
- Лейбман М.О., Кизяков А.И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. М.: Типография Россельхозакадемии, 2007. 206 с.
- Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1955. 348 с.
- Мирихулава Ц.Е. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии. М.: Колос, 1970. 240 с.
- Познанин В.Л. Эрозионные процессы в криолитозоне // Пространство и время. 2012. № 1. С. 127–132.
- Сидорчук А.Ю. Динамическая модель овражной эрозии // Геоморфология. 1998а. № 4. С. 28–38.
- Сидорчук А.Ю. Модель для расчета морфометрии стабильного оврага // Геоморфология. 1998б. № 2. С. 43–52.
- Сидорчук А.Ю. Оценка овражного потенциала территории на примере центрального Ямала // География и природные ресурсы. 2020. № 2(161). С. 109–118.
- Park C.C. World-wide variations in hydraulic geometry exponents of stream channels: An analysis and some observations, *J. Hydrol.*, 1977, vol. 33, p. 133–146.
- Schumm S.A. Geomorphic thresholds: the concept and its applications. *Trans. Inst. Brit. Geogr.*, 1979, NS4, p. 485–515.
- Sidorchuk A. Gully erosion in the cold environment: Risks and hazards. *Advances in Environmental Research*, vol. 44, Hauppauge NY: Nova Science Publ., 2015, p. 139–192.
- Sidorchuk A., Grigor'ev V. Soil erosion on the Yamal peninsula (Russian Arctic) due to gas field exploitation. *Advances GeoEcology*, 1998, vol. 31, p. 805–811.
- Wolman M.G., Miller J.P. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *Journal of Geology*, 1960, vol. 68(1), p. 54–74.
- Электронные ресурсы
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942. URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения 10.11.2019).
- ArcticDEM, 2018. Harvard Data V1. URL: <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH> (дата обращения 10.11.2019).
- QGIS Development Team, 2004–2019. V3.10 URL: <https://qgis.org> (дата обращения 10.11.2019).

Поступила в редакцию 22.11.2019

После доработки 21.04.2020

Принята к публикации 25.08.2020

A.Yu. Sidorchuk¹

EXPRESS METHOD OF ESTIMATION OF GULLY EROSION POTENTIAL

An express method for calculation of gully erosion potential is proposed. It is based on the estimation of critical flow characteristics at which linear erosion of soil begins. The novelty of the proposed approach is the transition from calculating the critical velocity of erosion initiation to calculating the critical runoff depth at which such velocity is realized. All values necessary for calculating the critical runoff depth and the gully erosion potential as the normalized difference between the maximum runoff depth and its critical value are well-defined and could be obtained both from measurements and by calculation. The method is easily and quickly implemented in any geographical information system; the output is the distribution of the level of the gully potential over the territory (catchment) and the degree of risk of the development of gully erosion for the entire territory (catchment). The results of evaluating the gully erosion potential by the express method were compared with the data of gully erosion calculation using the detailed dynamic model and showed the satisfactory agreement. This confirms the possibility of applying the express-method for quick assessment of development potential of particular territories, as well as the risks of landscape disturbance during natural processes of gully erosion.

Key words: gully erosion; critical runoff depth; Yamal Peninsula

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-60147).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: fluvial05@gmail.com

REFERENCES

- Bobrovitskaya N.N., Baranov A.V., Vasilenko M.N., Zubkova K.M. Stok vody i nanosov na ovrazhnykh vodosborakh [Water and sediment runoff in gully catchments] *Eroziionnyye protsessy tsentral'nogo Yamala* [Erosion processes in the Central Yamal Peninsula] A.Yu. Sidorchuk, A.V. Baranov (Eds.). St. Petersburg, RNIi kul'turnogo i prirodnogo naslediya Publ., 1999, p. 90–105. (In Russian)
- Gafurov A.M., Rysin I.I., Golosov V.N., Grigoriev I.I., Sharifullin A.G. Otsenka sovremennogo rosta vershin ovragov yuzhnogo megasklona Vostochno-Yevropeyskoy ravniny s primeneniym nabora instrumental'nykh metodov [Estimation of the recent rate of gully head retreat on the southern megaslope of the East European Plain using a set of instrumental methods], *Vestnik Mosk. Un-ta. Series 5. Geogr.*, 2018, no. 5, p. 61–68. (In Russian)
- Gidrologiya zabolochennykh territoriy zony mnogoletney merzloty Zapadnoy Sibiri [Hydrology of wetlands within the permafrost zone of Western Siberia]. Novikov S.M. (Ed.). St. Petersburg, VVM Publ., 2009, 536 p. (In Russian)
- Grigoriev I.I., Kovalev S.N., Rysin I.I. Tekhnogennyye ovragi [Technogenic gullies] *Geomorfologiya*, 2016, no. 2, p. 27–33. (In Russian)
- Kuznetsov M.S. Protivoerozionnaya stoykost' pochv [Erosion resistance of soils]. Moscow, Moscow Univ. Publ., 1981, 136 p. (In Russian)
- Leibman M.O., Kizyakov A.I. Kriogennyye opolzni Yamala i Yugorskogo poluostrova [Cryogenic landslides of the Yamal and Ugra peninsulas]. Moscow, Rossel'khozakademiya Publ., 2007, 206 p. (In Russian)
- Makkaveev N.I. Ruslo reki i eroziya v eyo basseine [River channel and erosion in its basin]. Moscow, AN SSSR Publ., 1955, 348 p. (In Russian)
- Mirtskhulava C.E. Inzhenernyye metody rascheta i prognoza vodnoy erozii [Engineering methods for calculating and predicting water erosion]. Moscow, Kolos Publ., 1970, 240 p. (In Russian)
- Park C.C. World-wide variations in hydraulic geometry exponents of stream channels: An analysis and some observations, *J. Hydrol.*, 1977, vol. 33, p. 133–146.
- Poznanin V.L. Eroziionnyye protsessy v kriolitozone [Erosion processes in the permafrost zone], *Prostranstvo i vremya*, 2012, no. 1, p. 127–132. (In Russian)
- Schumm S.A. Geomorphic thresholds: the concept and its applications, *Trans. Inst. Brit. Geogr.*, 1979, NS4, p. 485–515.
- Sidorchuk A.Yu. Dinamicheskaya model' ovrazhnoy erozii [Dynamic model of gully erosion], *Geomorfologiya*, 1998a, no. 4, p. 28–38. (In Russian)
- Sidorchuk A.Yu. Model' dlya rascheta morfometrii stabil'nogo ovraga [Model for calculating the morphometry of a stable gully], *Geomorfologiya*, 1998b, no. 2, p. 43–52. (In Russian)
- Sidorchuk A. Gully erosion in the cold environment: Risks and hazards, *Advances in Environmental Research*. 2015, vol. 44. Hauppauge NY, Nova Science Publ., p. 139–192.
- Sidorchuk A.Yu. Assessing the gully potential of a territory (a case study of Central Yamal), *Geography and Natural Resources*, 2020, vol. 41, no. 2, p. 178–186.
- Sidorchuk A., Grigor'ev V. Soil erosion on the Yamal peninsula (Russian Arctic) due to gas field exploitation. *Advances GeoEcology*, 1998, vol. 31, p. 805–811.
- Voskresenski K.S. Sovremennyye rel'yefoobrazuyushchiye protsessy na ravninakh Severa Rossii [Modern relief-forming processes on the plains of the North of Russia]. Moscow, Moscow Univ. Publ., 2001, 240 p. (In Russian)
- Wolman M.G., Miller J.P. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes, *Journal of Geology*, 1960, vol. 68, no. 1, p. 54–74.
- Zorina Ye.F. Raschetnyye metody opredeleniya potentsiala ovrazhnoy erozii [Methods of calculating gully erosion potential] *Eroziya pochv i ruslovyye protsessy* [Soil erosion and channel processes]. Moscow, Moscow Univ. Publ., 1979, iss. 7, p. 81–90. (In Russian)
- Web-sources
- ArcticDEM, 2018. Harvard Data V1. URL: <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH> (access date 10.11.2019).
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Alexandrova T.M. Opisanie massiva dannykh sutochnoy temperatury vozdukh i kolichestva osadkov na meteorologicheskikh stantsiyakh Rossii i byvshego SSSR (TTTR) [Description of the data array of daily air temperature and precipitation at meteorological stations of Russia and the former USSR (TTTR)]. Certificate of state registration of the database no. 2014620942, URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#data-array> (in Russian) (access date 10.11.2019).
- QGIS Development Team, 2004 – 2019. V3.10, URL: <https://qgis.org> (access date 10.11.2019).

Received 22.11.2019

Revised 21.04.2020

Accepted 25.08.2020