

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.435.162

Д.А. Безухов¹, А.Л. Энтин²**ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОМОИННОЙ СЕТИ В ПРЕДЕЛАХ РАСПАХИВАЕМЫХ МЕЖДУРЕЧИЙ**

Работа посвящена прогнозированию развития линейных эрозионных форм на распаханых склонах междуречий центральной части Русской равнины. По топографическим картам 1988 г. (масштаб 1:10 000) построены цифровые модели двух ключевых участков в бассейнах рек Медведица (Саратовская область) и Ведуга (Воронежская область), а также выделены тальвеги ложбин, существовавшие на тот момент. На основе этой информации для ключевых участков рассчитан ряд морфометрических характеристик и проведена морфометрическая классификация рельефа. По выделенным классам с применением теоремы Байеса рассчитана вероятность развития промоин в ложбинной сети. Значения вероятности менее 10% считаются фоновыми, значения 10–20% соответствуют потенциальным участкам развития эрозии, значения вероятности более 30% соответствуют исходным тальвегам ложбин. Применимость данного метода ограничивается геоморфологическим строением изучаемой территории: чем выше густота горизонтального расчленения, тем ниже прогностическая способность. Установлено, что, судя по расположению тальвегов в 1988 г. и в конце 2010-х годов, линейная эрозия за последние 30 лет существенно не активизировалась.

Ключевые слова: эрозионная сеть, ложбины, промоины, рельеф междуречий, малые эрозионные формы, морфометрический анализ, вероятностный метод, Русская равнина

Введение. Линейные эрозионные формы – овраги и промоины – являются одними из самых динамично развивающихся форм флювиального рельефа в пределах равнин умеренного пояса в современных климатических условиях. В условиях равнинного рельефа скорость роста оврагов может достигать нескольких десятков, а иногда и сотен метров в год [Рысин, 1998], а промоинная сеть, преимущественно формирующаяся на пашне в днищах склоновых ложбин, может способствовать потерям почвы, достигающим десятков тонн с гектара за одно эрозионное событие [Голосов с соавт., 1996]. Расширение территории, занятой сетью оврагов, ведет к снижению площадей пашни, формирование промоин способствует резкому сокращению плодородия почв, а в случаях их переуглубления – формированию оврагов [Ковалев, 2011; Голосов с соавт., 1996]. Поэтому определение закономерностей развития линейных форм эрозии, количественная оценка их распространения и прогноз развития являются весьма актуальными научными проблемами.

Одними из относительно малоизученных с количественной точки зрения форм рельефа являются ложбины распахиваемых междуречий южного мегасклона Русской равнины – линейно вытянутые понижения с пологими склонами глубиной несколько метров. По своему происхождению они преимущественно являются плейстоценовыми реликтовыми флювиальными формами рельефа [Еременко,

Панин, 2011]. Ложбины служат каналами стока дождевых и талых вод, а также путями транспортировки наносов.

Главной особенностью современного развития ложбин распахиваемых междуречий выбранного региона является активное образование в их днищах промоин, известных в англоязычной литературе под термином «ephemeral gully» (временный овраг, то есть овраг, который можно запахать). Они закладываются по днищам распахиваемых ложбин благодаря концентрации поверхностного стока воды, возникающего в процессе выпадения стокоформирующих ливней или в период весеннего снеготаяния. Согласно проведенным исследованиям [Roesen, Nooke, 1997], количество материала, выносимого за счет формирования подобных крупных промоин, может достигать 44–80% от суммарных потерь почвы с участка пашни. Например, длительные мониторинговые наблюдения за стоком воды и наносов, проводившиеся на склоновых водосборах в бассейне р. Протвы, позволили установить, что среднемноголетний смыв почвы с ложбинных водосборов в период снеготаяния составил 2,9 т/га в год, тогда как смыв почвы с остальных склонов и склоновых водосборов – всего 0,39 т/га в год [Литвин с соавт., 1998]. Поэтому важно количественно оценить процесс развития промоин в ложбинной сети для принятия противоэрозионных мер и корректировки землепользования на обрабатываемых землях.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, аспирант; *e-mail:* goldplacer@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра картографии и геоинформатики, аспирант; *e-mail:* andrei.entin.worknstudy@gmail.com

Развитие ложбин зависит от набора природно-антропогенных факторов, среди которых важную роль играют характеристики рельефа водосбора ложбины и параметры самой ложбины, густота ложбинной сети на пашне, противоэрозионная устойчивость почв, метеорологические условия формирования поверхностного стока при выпадении ливней или талом стоке, проективное покрытие почвы посевами. Тем не менее, в пределах распаханых территорий малых склоновых водосборов определяющим фактором развития промоинной сети в ложбинах является рельеф склонов междуречий, который определяет граничные возможности развития промоинной сети и характер формирования стока воды на распахиваемых склонах.

Существуют методы, позволяющие исследователю оценить риск развития эрозионных процессов в различных масштабах, определяя статистические отношения между набором неких переменных и пространственным распределением форм рельефа, связанных с процессами водной эрозии. Эти методы, в отличие от физических моделей, не дают в качестве конечного результата объем или массу выносимого материала, однако позволяют оценить пространственную вероятность возникновения эрозионных форм рельефа [Conoscenti et al., 2013].

Целью данной работы является разработка подхода к определению участков с максимальной вероятностью развития промоинной сети на основе крупномасштабных данных о рельефе. Изучались два ключевых участка. Задачами исследования были построение карт вероятности развития промоин, сравнение и сопоставление полученных карт с данными дистанционного зондирования. Поэтому работа разделялась на следующие этапы: построение цифровой модели рельефа (ЦМР), вычисление основных морфометрических показателей, переклассификация параметров рельефа, построение тальвегов ложбин, сопоставление классов переклассифицированного рельефа с расположением тальвегов – получение карты вероятности развития эрозионных процессов, сравнение полученных результатов для ключевых участков и верификация использованной методики.

Объекты исследования. В качестве ключевых были выбраны участки с различными природными условиями, в частности, с различиями в строении рельефа междуречий, а также с максимальным количеством ложбинных водосборов, целиком попадающих в лист топографической карты масштаба 1:10 000 и находящихся в границах пашни.

Участок «Медведица» находится в Аткарском районе Саратовской области на высоких приводо-раздельных пространствах Приволжской возвышенности (до 300 м над ур. м.), сложенных палеогеновыми песками, песчаниками и глинами (рис. 1). Склоны, примыкающие к водоразделам, покрыты элювиально-делювиальными суглинками или щебнем. На данной территории преобладают обыкновенные и малогумусные щебнистые черноземы, до начала массовой распашки занятые разнотравно-

типчакково-ковыльными степями с островками дубовых лесов. Среднегодовое количество осадков на исследуемом участке 400–450 мм, средние температуры июля 20...–21°C, января –11...–12°C [Атлас Саратовской области, 1978].

Участок «Ведуга» расположен в Семилукском районе Воронежской области на восточных отрогах Среднерусской возвышенности, сложенных мелом и мергелями мезозоя. Четвертичные отложения представлены здесь аллювиальными позднплейстоцен-голоценовыми песками, суглинками и глинами в долинах рек и ледниковыми и водно-ледниковыми песками, суглинками и глинами, перекрытыми чехлом покровных суглинков. На данном участке преобладают типичные черноземы с луговыми степями. Среднегодовая температура июля 19...–20°C, января –9...–10°C, среднегодовое количество осадков 400–500 мм [Атлас Воронежской области, 1994].

В геоморфологическом отношении исследуемые участки значительно различаются между собой. Участок «Медведица» в центральной части представляет собой пологий макросклон, плавно переходящий в водораздельное пространство, расчлененный густой сетью длинных вытянутых ложбин, иногда образующих древовидные структуры. В северной части междуречья они располагаются ближе к днищу долины, чем в южной части, что находит отражение в виде сети одиночных коротких и глубоко врезанных ложбин. Средняя длина ложбин участка «Медведица» составляет 500–1500 м, их ширина 100–150 м, глубина 2–3 м, крутизна бортов 3–5 градусов. Несмотря на значительную амплитуду высот (до 100 м), рельеф данного участка менее контрастен, чем на участке «Ведуга», где четко выделяются долинная (южная и северная) и центральная междуречная части. Ложбинная сеть на «Ведуге», в отличие от «Медведицы», представлена в основном одиночными ложбинами, истоки которых не заходят глубоко на водораздельные пространства. Таким образом, густота расчленения участка «Ведуга» значительно меньше, что может быть обусловлено историей развития рельефа, а также связано с литологическим составом подстилающих пород. Средняя длина ложбин на «Ведуге» составляет 500–1000 м, ширина 150–200 м, глубина 2–4 м, крутизна бортов 4–6 градусов. Более 60% территории на обоих ключевых участках распаханно.

Материалы и методы исследований. В работе используется усовершенствованная нами методика оценки вероятности развития промоин, разработанная на примере изучения линейных форм склоновой эрозии на острове Сицилия [Conoscenti et al., 2013]. Мы исследовали тальвеги ложбин, построенные по ЦМР. В качестве исходных данных использовались оцифрованные листы топографической карты масштаба 1:10 000 с состоянием местности на 1988 г. для территорий, расположенных в бассейнах рек Медведица и Ведуга. На основе ЦМР создавался «растр эрозии», состоящий из тех ячеек (пикселей), которые включали отрезки тальвегов ложбин.

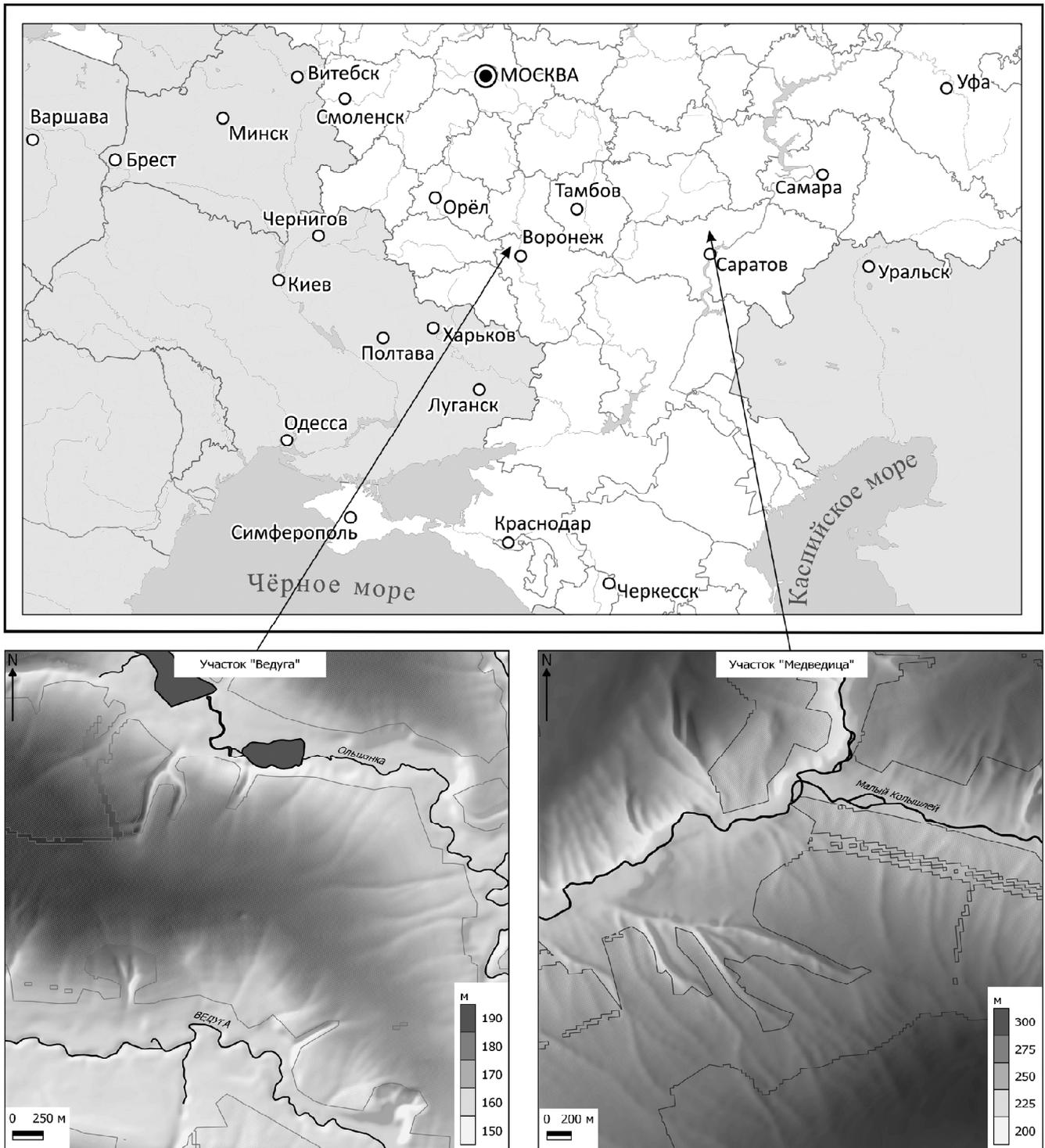


Рис. 1. Географическое положение исследуемых участков. Серыми линиями показаны границы пашни

Fig. 1. Geographical location of the key sites. Cropland borders are shown by grey lines

В исходной методике [Conoscenti et al., 2013] в качестве морфометрических параметров, с которыми связана вероятность развития промоин на исследуемых участках, использовались следующие: крутизна (град.), экспозиция (град.), горизонтальная кривизна (m^{-1}), вертикальная кривизна (m^{-1}), общая кривизна (m^{-1}), тангенциальная кривизна (m^{-1}), индекс мощности потока, топографический индекс

влажности, LS-фактор, используемый в универсальном уравнении эрозии почв USLE [Wishmeier, Smith, 1965].

На наш взгляд, такое количество параметров избыточно. Во-первых, влияние экспозиции склона при крупномасштабном исследовании, где могут быть не в полной мере представлены склоны некоторых экспозиций, представляется сомнительным.

Оценка влияния экспозиции в таком случае характеризует не общие закономерности, а уникальность природных условий изучаемой территории, поэтому в рамках данного исследования при расчетах вероятности этот параметр не использовался. Во-вторых, горизонтальная и тангенциальная кривизна функционально взаимосвязаны [Флоринский, 2010], а общая кривизна является комбинацией плановой и профильной кривизны. В-третьих, индекс мощности потока и топографический индекс влажности функционально связаны с крутизной склона и общей водосборной площадью, расположенной выше по склону от каждой из ячеек. Индекс мощности потока представляет собой натуральный логарифм произведения этих величин, топографический индекс влажности – логарифм их отношения. Вследствие этого мы исключили из рассмотрения индекс мощности потока и топографический индекс влажности и использовали вместо них десятичный логарифм общей водосборной площади. То же касается и популярного в исследованиях, посвященных оценке темпов эрозии почв, произведения факторов длины (L) и крутизны (S) склона универсального уравнения смыва почвы. В рамках ГИС-анализа они функционально взаимосвязаны, соответственно, с общей водосборной площадью и крутизной (в расчете используются простые алгебраические функции и эмпирические коэффициенты). Следовательно, привлечение комбинированного LS-фактора для анализа мы также считаем нецелесообразным, вместо него используются крутизна и десятичный логарифм общей площади водосбора.

Вместо исключенных из анализа параметров мы дополнительно привлекли следующие морфометрические характеристики: максимальную длину линии тока и глубину расчленения (valley depth). Под длиной линии тока подразумевалась длина линии, построенной от ячейки ЦМР вниз по склону по направлениям стока до границы ЦМР или до другой точки, из которой не определено направление стока. Глубина расчленения рассчитывалась по водораздельным линиям, построенным по ЦМР, на основе которых выделялись междуречные поверхности. Между этими поверхностями производилась интерполяция высот по методу сплайнов с натяжением. Глубина расчленения вычислялась как разность между интерполированными междуречными поверхностями.

Таким образом, полный список используемых нами морфометрических параметров выглядит следующим образом: крутизна, плановая кривизна, профильная кривизна, десятичный логарифм общей площади водосбора, максимальная длина линии тока, глубина расчленения.

Для каждого из этих показателей построены растры, в которых каждой ячейке исходной ЦМР и «растра эрозии» соответствует значение какого-либо параметра. Следовательно, мы можем сопоставить несколько морфометрических параметров для каждой ячейки с проявлениями линейной эрозии, либо оценить вероятность ее развития на пока нетронутых участках.

Диапазон значений параметров рельефа весьма широк для проведения вероятностных оценок, поэтому полученные растры необходимо было переклассифицировать в некий набор классов, содержащих значения в различных диапазонах. Переклассификация осуществлялась путем деления совокупности значений растров на промежутки, равные одному среднеквадратичному отклонению. Для того чтобы соотнести полученные наборы классов морфометрических параметров рельефа непосредственно с эрозионными явлениями, использовалась концепция «уникальной условной единицы» (unique condition unit, далее UCU), введенной при исследованиях оползневых процессов в Южной Италии [Carrara et al., 1995]. UCU представляет собой числовое значение, составленное из номеров классов параметров рельефа, вычисленное для каждой ячейки растра, соответствующей ячейке ЦМР (рис. 2). Каждая UCU является геоморфологической единицей, выделенной по морфометрической классификации. Таким образом, UCU – это интегральная характеристика рельефа и может быть сопоставлена с проявлениями линейной эрозии на склонах междуречий.

UCU определяется как условная вероятность начала линейной эрозии по теореме Байеса в соответствии со следующей формулой [Conoscenti et al., 2013]:

$$P\left(\frac{\text{gully}}{\text{UCU}}\right) = \left(P_{\text{gully}} * P\left(\frac{\text{UCU}}{\text{gully}}\right) \right) / P_{\text{UCU}},$$

где P_{gully} – вероятность эрозионного события, $P_{\text{UCU/gully}}$ – вероятность формирования рельефа с определенной UCU в условиях развития эрозионных процессов, P_{UCU} – вероятность определенной UCU.

$$P_{\text{gully}} = N_{\text{erosion}} / N$$

$$P\left(\frac{\text{UCU}}{\text{gully}}\right) = N_{\text{UCU in erosion}} / N_{\text{erosion}}$$

$$P_{\text{UCU}} = N_{\text{UCU}} / N,$$

где N – общее количество ячеек ЦМР, N_{erosion} – количество ячеек растра эрозии, $N_{\text{UCU in erosion}}$ – количество ячеек определенного номера UCU, пересекающихся с растром эрозии, N_{UCU} – количество всех ячеек UCU с определенным номером.

Следовательно:

$$P\left(\frac{\text{gully}}{\text{UCU}}\right) = \frac{N_{\text{erosion}}}{N} * \frac{N_{\text{UCU in erosion}}}{N_{\text{erosion}}} / \frac{N_{\text{UCU}}}{N},$$

или

$$P\left(\frac{\text{UCU}}{\text{gully}}\right) = N_{\text{UCU in erosion}} / N_{\text{UCU}},$$

Полученная таким образом вероятность является основой для построения карт вероятности развития промоин.

ЦМР на ключевые участки созданы путем морфометрического анализа. С топографических карт масштаба 1:10 000 была снята следующая информация: горизонтали (основные, вспомогательные и дополнительные), отметки высот и урезов воды, водотоки и водоемы, обрывы, овраги и обозначенные рытвины.

Векторные наборы данных были использованы для выполнения интерполяции по алгоритму ANUDEM (модуль Topo to Raster системы ArcGIS [Hutchinson et al., 2011]). Для определения допустимых размеров ячейки использовался метод, включающий расчет «плотности» горизонталей и определение минимальных расстояний до них на «частой» сетке [Hengl, 2006]. Максимальный приемлемый размер ячейки, в соответствии с этим методом, равен половине среднего расстояния между горизонталями. Минимальный приемлемый размер ячейки определяется распределением этих расстояний (95% расстояний должны быть больше выбранного шага). Исходя из таких критериев, интервал допустимых значений размера ячейки для «Медведицы» составил 5,8–22,0 м, для «Ведуги» 3,4–10,0 м. В итоге использовались модели с размером ячейки 10 м для каждого изучаемого участка. Краевые части моделей (около 100 м на местности, отсчитывая от рамок карты) были исключены из итогового набора после интерполяции для минимизации краевых эффектов.

На каждый из участков была получена ЦМР. На ее основе создан ряд производных растров: крутизна склона, горизонтальная (плановая) кривизна, вертикальная (профильная) кривизна, общая водосборная площадь, максимальная длина линии тока, «глубина» относительно восстановленной поверхности водораздела. Растры крутизны и кривизны построены непосредственно по ЦМР, для расчета остальных растров создана вспомогательная («гидрологически корректная») ЦМР. Эта модель получена из исходной ЦМР путем заполнения замкнутых локальных понижений. Расчет морфометрических параметров производился в программе SAGA GIS [Congrad et al., 2015] с использованием следующих инструментов: *Slope*, *Aspect*, *Curvature* для вычисления крутизны склона, горизонтальной и вертикальной кривизны; *Flow Accumulation (Top-Down)* для вычисления общей водосборной площади; *Maximum Flow Path Length* для вычисления максимальной длины линии тока; *Valley Depth* для вычисления глубины эрозионного расчленения рельефа. Результаты расчетов были импортированы в ArcGIS, где морфометрические параметры были переклассифицированы. Крутизна склона, максимальная длина линии тока и глубина расчленения рельефа переклассифицировались по методу стандартных отклонений. Общая водосборная площадь нормализована путем вычисления ее десятичного логарифма, а затем уже нормализованный растр подвергнут переклассификации, также по методу стандартных отклонений. Растры кривизны переклассифицированы с применением «ручного» разбиения на три класса: отрица-

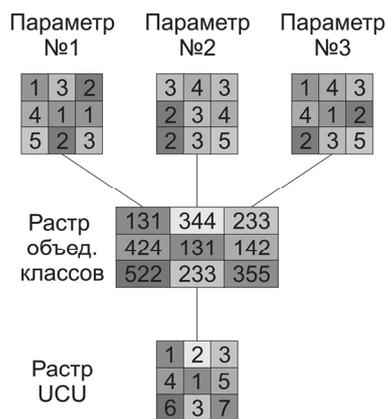


Рис. 2. Схема построения растра UCU. Цифрами показаны номера классов. Параметр №1, 2, 3 – морфометрические параметры, используемые при классификации

Fig. 2. UCU raster creation scheme. Numerals are for class numbers. Parameter № 1, 2, 3 are morphometric characteristics used for classification

тельных, нулевых и положительных значений. В итоге получено шесть целочисленных растров, представляющих собой классифицированные морфометрические показатели, по нашему мнению в совокупности оказывающие наибольшее влияние на формирование промоин. Эти шесть растров наложены друг на друга с определением уникальных комбинаций классов (UCU). Каждая уникальная комбинация в дальнейшем трактовалась как самостоятельный класс. Помимо перечисленных растров, получен бинарный растр сети тальвегов, совпадающий по охвату и размеру ячейки с растрами морфометрии (рис. 3).

Путем сопоставления бинарного растра сети тальвегов с полученными классами UCU, по вышеприведенным формулам для каждой ячейки ЦМР рассчитаны значения вероятности развития промоин. Полученная конфигурация вероятности развития линейных эрозионных форм рельефа верифицировалась с помощью методов дистанционного зондирования. Исходная сеть тальвегов снималась с топографических карт масштаба 1:10 000, построенных на основе топографической съемки 1988 г. С помощью программы SASPlanet на исследуемые участки скачивались летние космические снимки 2010-х годов разрешением 1 м, по которым оцифровывались тальвеги линейных эрозионных форм, образовавшиеся позже проведения топографических съемок. Таким образом, полученная вероятность развития эрозионных процессов сравнивалась с данными о фактическом приросте тальвегов линейных форм рельефа за период с 1988 г. до 2010-х годов.

Результаты и обсуждение. Для исследуемых участков рассчитаны основные морфометрические параметры (табл.). Рассматриваемые ключевые участки заметно отличаются друг от друга по морфометрическим характеристикам. Например, участок «Ведуга» с глубже врезанными линейными эро-

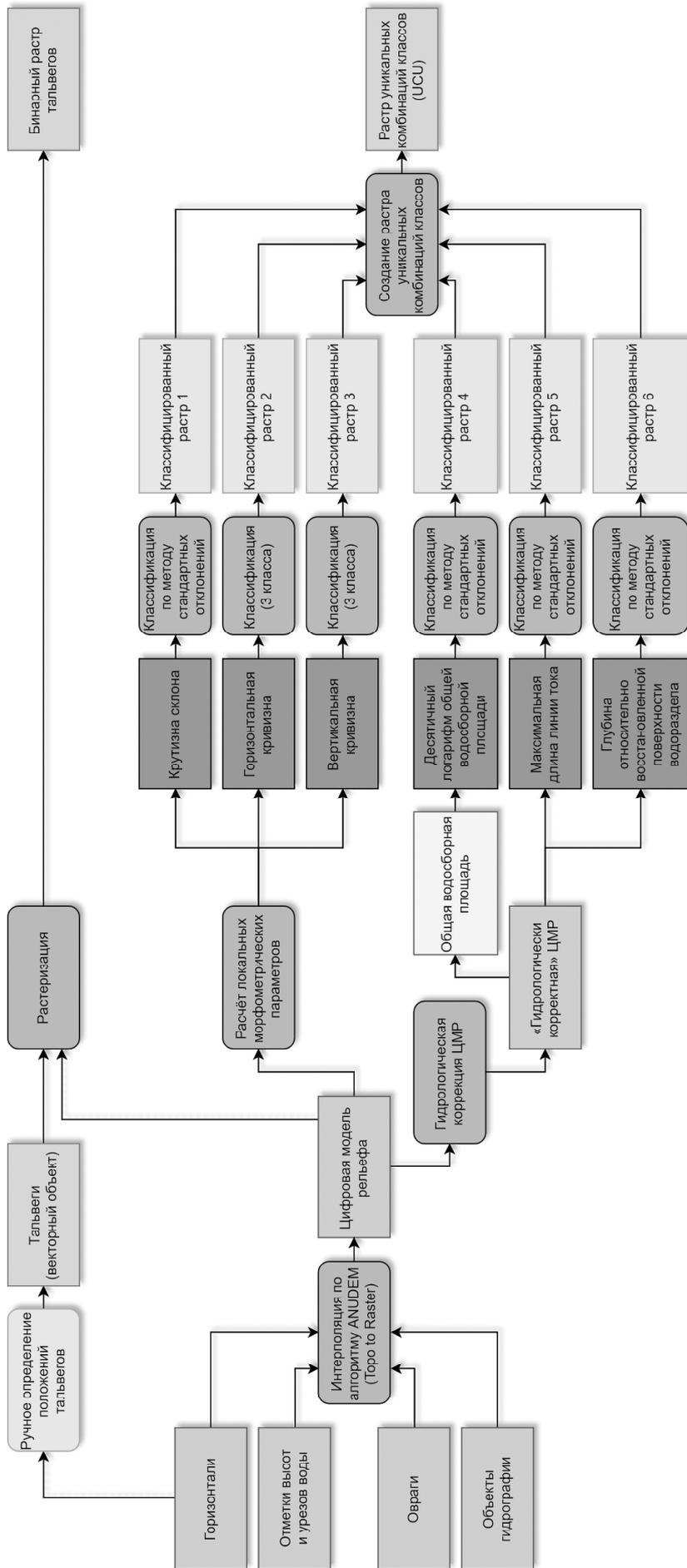


Рис.3. Схема создания слоев для составления карты вероятности развития промоин
 Fig. 3. The scheme of creating layers for drawing a probability map for ephemeral gully formation

Основные морфометрические показатели участков «Медведица» и «Ведуга»

Показатель	Медведица				Ведуга			
	<i>Min</i> *	<i>Max</i>	<i>Avg</i>	<i>Std</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Avg</i>	<i>Std</i>
1. Крутизна, град.	0	20,63	2,74	2,25	0	28,87	2,7	2,19
2. Плановая кривизна, м ⁻¹	-24,5	2,02	0	0,08	-43,34	4,01	0	0,15
3. Профильная кривизна, м ⁻¹	-0,07	0,05	0	0	-0,06	0,06	0	0
4. Десятичный логарифм общей площади водосбора, ед.	2	7,14	3,28	0,58	2	6,83	3,32	0,61
5. Максимальная длина линии тока, м	0	6987,66	2628,97	1539,24	0	6864,52	2178,43	1494,63
6. Глубина расчленения, м	0	45,63	9,03	12,15	0	42,93	12,86	12,77

* *Min* – минимальное значение, *Max* – максимальное значение, *Avg* – среднее значение, *Std* – стандартное отклонение.

зионными формами характеризуется большей максимальной крутизной и плановой кривизной. Среднее значение максимальной длины линии тока на «Медведице» значительно выше, чем на «Ведуге», следовательно, участок «Медведица» расчленен сильнее. Очевидно, что на густо расчлененной территории с длинными линиями тока вероятность образования новых линейных эрозионных ниже, чем на слабо расчлененных участках с относительно короткими линиями тока и большей площадью свободных от линейной эрозии пространств.

Кроме того, участок «Ведуга» характеризуется большей глубиной расчленения междуречий (с учетом долинной сети) по сравнению с участком «Медведица».

По итогам анализа распределения вероятностей развития линейных эрозионных форм на склонах междуречий получены карты (рис. 4). При сравнении их между собой выявляется, что пространственное распределение этих вероятностей в целом отражает уже существующую структуру ложбинной сети. Это во многом является следствием построения ложбин для формирования так называемой «тренировочной выборки» на основе тех же исходных данных, что были использованы для ЦМР. Тем не менее, выведенные значения вероятности содержат в себе новую информацию. Например, для участка «Медведица» области вероятности от 10 до 20% приурочены к истокам ложбинной сети, одиночным ложбинам на склонах речных долин, притокам глубоко врезаемых ложбин, которые не были основой для классификации. Эти области, вероятно, отражают потенциальные очаги активизации эрозии, по их пространственному распространению возможно определить те эрозионные формы, которые могут активизироваться при возрастании антропогенной нагрузки или увеличении поверхностного стока в случае климатических изменений. На участке «Ведуга» территории со сходными величинами вероятности находятся, например, в восточной и юго-западной частях в местах отсутствия заметных затяжек горизонталей. В данном случае распределение вероят-

ности показывает возможность развития ложбин на склонах с относительно однородным рельефом. Таким образом, на «Ведуге» предсказательная способность используемой методики выше, чем на «Медведице». Скорее всего это связано с различием в геоморфологическом строении: густота расчленения участка «Ведуга» существенно ниже, территорий, занятых водосборами ложбин, больше, а значит лучше проявляется прогностическая информация.

По космическим снимкам оцифрованы тальвеги ложбин и оврагов, появившихся на участках «Медведица» и «Ведуга» после топографических съемок 1988 г. В результате получена «тренировочная выборка» тальвегов. Эти данные можно разделить на несколько типов: овраги природно-антропогенного (в бортах речных долин) и антропогенного (придорожные) происхождения, серии параллельных промоин на полях под паром, удлиненные тальвеги в пристоковых частях уже существующих ложбин, тальвеги ложбин на незатронутых линейной эрозией (по исходным данным) склонах.

Стоит отметить, что практическую значимость имеют значения вероятности развития эрозионных процессов от 10% до 30%. Ячейки раstra с такими вероятностями образуют пространственные структуры – потенциальные тальвеги или водосборы ложбин». Участки с вероятностью менее 10% считаются фоновыми и распространены повсеместно на обоих участках независимо от их геоморфологического строения. Участки с вероятностью более 30% практически полностью сосредоточены вокруг исходных тальвегов ложбин.

Среди сформировавшихся за примерно 30–35-летний период линейных форм рельефа или участков с удлинением существовавших форм наблюдаются следующие закономерности. Тальвеги антропогенных оврагов не отражаются в виде ячеек с повышенной вероятностью на полученном растре, что обусловлено их происхождением в результате размыва грунтовых дорог. Тальвеги природно-антропогенных оврагов, возникшие в южной части участка «Ведуга», приурочены к небольшим зонам с

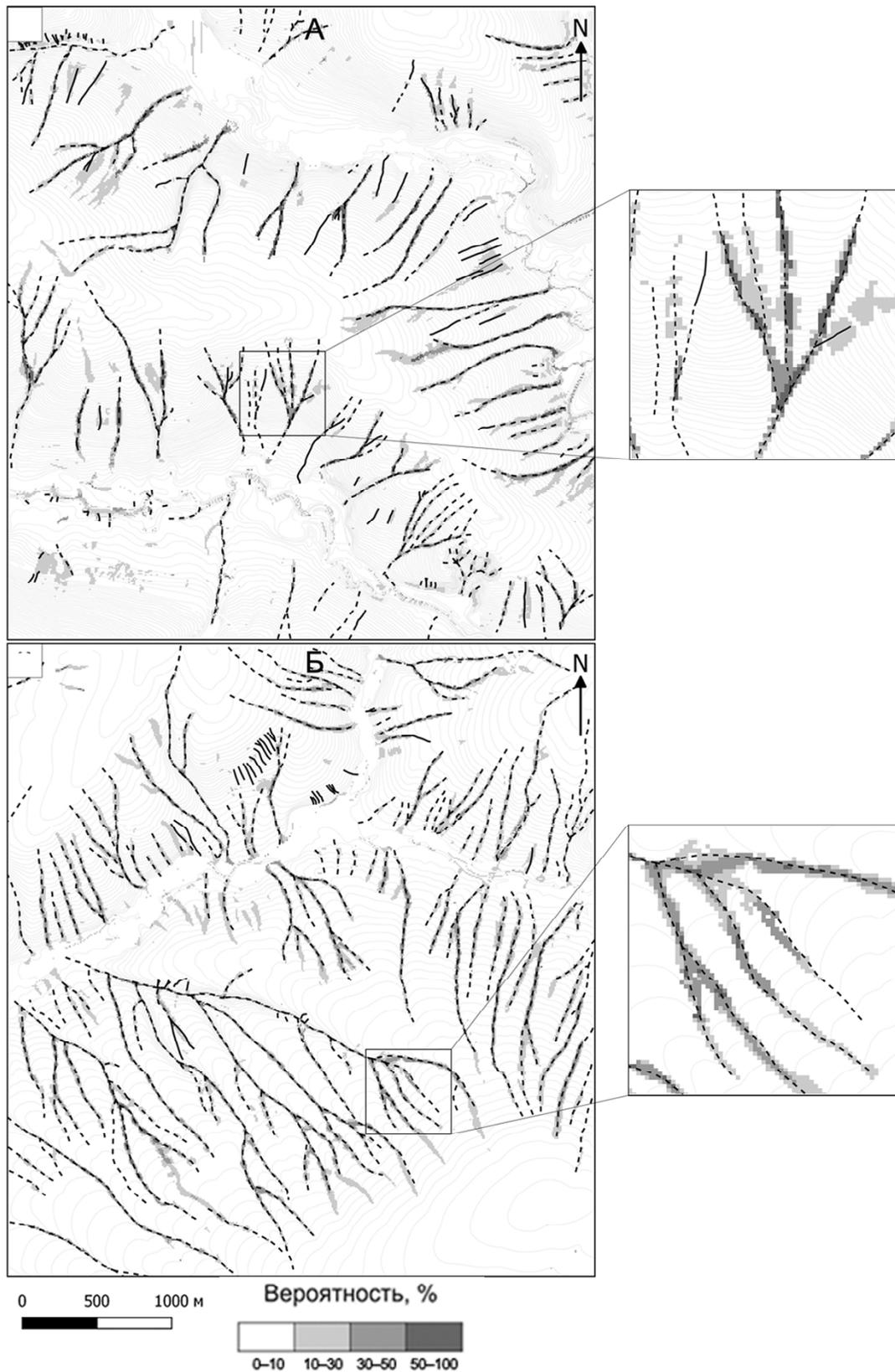


Рис. 4. Распределение вероятности формирования и развития линейных эрозионных форм на участках «Ведуга» (А) и «Медведица» (Б). Пунктирными линиями обозначены тальвеги, использованные для вычисления вероятности. Сплошными линиями обозначены тальвеги линейных эрозионных форм, появившиеся за последние 30 лет (по данным дешифрирования космических снимков)

Fig. 4. Distribution of the probability of linear erosion forms emergence and development at the key sites «Veduga» (A) and «Medveditsa» (B). Dashed lines indicate the thalwegs, for which the probability was calculated. Solid lines denote the thalwegs of linear erosion forms, which appeared during recent 30 years (according to the interpretation of space images)

вероятностью формирования линейных форм рельефа 10–30%. В областях развития параллельных промоин, обнаруженных в северной части участка «Медведица», вероятность формирования линейных форм – менее 10%, что объясняется вероятным заложением промоин по разъемным бороздам при распашке. Тальвеги в присточковых частях существующих ложбин как на «Медведице», так и на «Ведуге» также практически не обнаруживаются в районах с вероятностью развития эрозионных процессов более 10%.

Одиночные тальвеги ложбин, возникшие спустя несколько десятков лет с момента проведения топографических съемок, в большинстве случаев приурочены к участкам с вероятностью развития эрозионных процессов 10–30% (центральная и восточная части участка «Ведуга»). На участке «Медведица» тальвеги такого типа почти отсутствуют, что связано с уже существовавшей на период проведения топографической съемки густой сетью ложбин. Прирост длины тальвегов, оцифрованных по результатам дешифрирования космических снимков, на «Ведуге» составил 12%, на «Медведице» – 5%. Такая разница связана с меньшей плотностью линейной эрозионной сети участка «Ведуга» на момент создания топографических карт.

Выводы:

– методика прогнозирования развития линейных форм рельефа на склонах распаханых междуречий, основанная на вероятностной интерпретации морфометрических характеристик рельефа, хорошо

согласуется с морфологией рельефа исследуемых территорий и может применяться для предсказания развития линейных эрозионных форм на пашне;

– разрешающая способность данной модели для конкретного участка рельефа зависит от площади междуречных пространств, еще не затронутых процессами линейной эрозии. По мере реализации потенциала формирования линейных форм на конкретном междуречье существенно сокращается вероятность формирования новых форм, что закономерно снижает эффективность использования предложенной методики. Данная методика работает лучше на тех участках рельефа, где густота расчленения междуречных пространств меньше;

– применимость одного и того же морфометрического метода может ограничиваться типом рельефа изучаемой территории. На участке с менее расчлененным рельефом за последние десятилетия возникло больше линейных эрозионных форм, которые достаточно хорошо согласуются с областями, в которых вероятность развития эрозионных процессов составляет 10–30%;

– при существующих климатических условиях и характере землепользования существенной активизации развития линейных эрозионных форм не обнаружено, что согласуется с ранее проводимыми исследованиями [Панин с соавт., 2011];

– использованная методика позволяет выявить потенциальные очаги формирования новых линейных эрозионных форм и своевременно принять соответствующие противозерозионные мероприятия.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам Казанского федерального университета М.А. Иванову и А.Г. Шарифуллину за предоставленные пространственные данные, а также сотрудникам географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова – вед. науч. с. НИЛ эрозии почв и русловых процессов В.Н. Голосову и проф. кафедры геоморфологии и палеогеографии А.В. Панину за ценные советы и рекомендации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас Воронежской области. Воронеж: Укргеодезкартография, 1978. 48 с.
- Атлас Саратовской области. М.: ГУГК, 1994. 31 с.
- Голосов В.Н., Козловская М.Э., Пацукевич З.В. Специфика эрозионных процессов в юго-восточном Забайкалье // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1996. Т. 5. № 4. С. 46–50.
- Еременко Е.А., Панин А.В. Происхождение ложбинной сети в центральных и южных районах Восточно-Европейской равнины // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2011. № 3. С. 59–66.
- Ковалев С.Н. Овражно-балочные системы в городах. М.: Компания ПринтКоВ, 2011. 138 с.
- Литвин Л.Ф., Голосов В.Н., Добровольская Н.Г., Иванова Н.Н., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф. Стационарные исследования эрозии почв при снеготаянии в Центральном Нечерноземье // Эрозия почв и русловые процессы, М.: Изд-во МГУ, 1998. Т. 11. С. 57–76.
- Панин А.В., Еременко Е.А., Ковда И.В. Цикл эрозионного расчленения и выполнения эрозионной сети на северо-востоке Ставрополя в конце плейстоцена. Часть II. Современные балки. Эрозионная история региона // Геоморфология. 2011. № 2. С. 102–113.
- Рысин И.И. Овражная эрозия в Удмуртии. Ижевск: Изд-во Удмуртск. ун-та, 1998. 274 с.
- Флоринский И.В. Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа. Дис. ... докт. техн. н. Пушино: ИМПБ РАН, 2010. 267 с.
- Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F., Reichenbach P. GIS technology in mapping landslide hazard // Geographical information systems in assessing natural hazards. Springer, Dordrecht, 1995. P. 135–175.
- Conoscenti C., Agnesi V., Angileri S. et al. A GIS-based approach for gully erosion susceptibility modelling: a test in Sicily, Italy // Environmental Earth Sciences. 2013. V. 70. № 3. P. 1179–1195.
- Conrad O., Bechtel B., Bock M. et al. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geoscientific Model Development. 2015. V. 8. № 7. P. 1991–2007.
- Hengl T. Finding the right pixel size // Computers and Geosciences. 2006. V. 32. № 9. P. 1283–1298.

Hutchinson M., Xu T., Stein J. Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure // *Geomorphometry*. 2011. V. 2011. P. 19–22.

Poesen J.W.A., Hooke J.M. Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe // *Progress in Physical Geography*. 1997. V. 21. № 2. P. 157–199.

Wishmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the rocky mountains // *ARS-USDA in Cooperation with Purdue University, Purdue Agric. Exp. Sta. Handbook*. 1965. V. 282. 15 p.

Поступила в редакцию 30.07.2018

После доработки 20.04.2019

Принята к публикации 24.05.2019

D.A. Bezukhov¹, A.L. Entin²

PROBABILISTIC APPROACH TO FORECASTING THE FORMATION OF EPHEMERAL GULLY NETWORK WITHIN ARABLE INTERFLUVES

The article deals with forecasting of the ephemeral gully network on cultivated slopes of interfluves within the Central Russian Plain. Digital elevation models of two key areas in the basins of the Medveditsa River (Saratov region) and Veduga River (Voronezh region) were created using the 1988 topographic maps at the scale of 1:10 000 and the thalwegs of linear depressions existing at the time were identified. Basing on this information, a number of morphometric characteristics were calculated for key sites and a morphometric classification of the relief was elaborated. The probability of development of ephemeral gullies in a linear depressions network is calculated for particular classes using the Bayes theorem. Probability values of less than 10% are background, values of 10–20% correspond to the sites of potential erosion development, and probability values of more than 30% correlate with initial thalwegs of linear depressions. The applicability of probabilistic method is limited by geomorphological structure of the studied territory – the higher the density of horizontal dissection, the lower the predictive ability. According to the location of thalwegs in 1988 and in the late 2010s no significant increase in linear erosion over the past 30 years took place.

Key words: erosion network, hollows, ephemeral gully, interfluve relief, small erosion forms, morphometric analysis, probabilistic method, the Russian Plain

Acknowledgements. The authors are sincerely grateful to A. Ivanov and A.G. Sharifullin, both from the Kazan Federal University, for provided spatial data; and to V.N. Golosov, (Leading Scientific Researcher of the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes), and A.V. Panin, (Professor of the Department of Geomorphology and Paleogeography, MSU Faculty of Geography), for valuable advices and recommendations.

REFERENCES

Atlas Saratovskoy oblasti [Saratov region atlas]. M.: GUGK, 1994. 31 p. (In Russian)

Atlas Voronezhskoy oblasti [Voronezh region atlas]. Voronezh, 1978. 48 p. (In Russian)

Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F., Reichenbach P. GIS technology in mapping landslide hazard // *Geographical information systems in assessing natural hazards*. Springer, Dordrecht, 1995. P. 135–175.

Conoscenti C., Agnesi V., Angileri S. et al. AGIS-based approach for gully erosion susceptibility modelling: a test in Sicily, Italy // *Environmental Earth Sciences*. 2013. V. 70. № 3. P. 1179–1195.

Conrad O., Bechtel B., Bock M. et al. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // *Geoscientific Model Development*. 2015. V. 8. № 7. P. 1991–2007.

Eremenko E.A., Panin A.V. Proiskhozhdeniye lozhbinnoy seti v tsentral'nykh i yuzhnykh rayonakh Vostochno-Yevropeyskoy ravniny [Genesis of linear depressions network in the central and southern regions of the East European Plain] // *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geogr.* 2011. № 3. P. 59–66. (In Russian)

Florinskiy I.V. Teoriya i prilozheniya matematiko-kartograficheskogo modelirovaniya rel'yefa [Theory and applications of mathematical and cartographic terrain modeling], Dis. ... d.t.n. Pushchino, IMPB RAN, 2010. 267 p. (In Russian)

Golosov V.N., Kozlovskaya M.E., Patsukevich Z.V. Spetsifika erozionnykh protsessov v yugo-vostochnom Zabaykal'ye [Specific features of erosion processes in the southeastern Transbaikalia] // *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geogr.* 1996. V. 5. № 4. P. 46–50. (In Russian)

Hengl T. Finding the right pixel size // *Computers and Geosciences*. 2006. V. 32. № 9. P. 1283–1298.

Hutchinson M., Xu T., Stein J. Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure // *Geomorphometry*. 2011. V. 2011. P. 19–22.

Kovalev S.N. Ovrazhno-balochnyye sistemy v gorodakh [Gully-balka systems in cities]. M.: Kompaniya PrintKoV, 2011. 138 p. (In Russian)

Litvin L.F., Golosov V.N., Dobrovolskaya N.G., Ivanova N.N., Kiryuhina Z.P., Krasnov S.F. Statsionarnyye issledovaniya erozii

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, postgraduate student; *e-mail:* goldplacer@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Cartography and Geoinformatics, postgraduate student; *e-mail:* andrei.entin.worknstudy@gmail.com

pochv pri snegotayanii v tsentral'nom Nechernozem'ye [Stationary studies of soil erosion during snow melting in the central Non-Chernozem region] // *Eroziya pochv i ruslovyye protsessy*. M.: Izd-vo MGU, 1998. V. 11. P. 57–76. (In Russian)

Panin A.V., Eremenko E.A., Kovda I.V. Tsikl erozionnogo raschleneniya i vypolneniya erozionnoy seti na severo-vostoke Stavropol'ya v kontse pleystotsena. Chast' II. Sovremennyye balki. Eroziionnaya istoriya regiona [Late Pleistocene cycle of erosion dissection and infilling of the drainage network in the north-eastern Stavropol territory (Part 2. Recent balkas. History of the drainage network)] // *Geomorfologiya*. 2011. № 2. P. 102–113. (In Russian)

Poesen J.W.A., Hooke J.M. Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe // *Progress in Physical Geography*. 1997. V. 21. № 2. P. 157–199.

Rysin I.I. Ovrazhnaya eroziya v Udmurtii [Gully erosion in Udmurtia]. Izhevsk: Izd-vo Udmurtsk. un-ta, 1998. 274 p. (In Russian)

Wishmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the rocky mountains // *ARS-USDA in Cooperation with Purdue University, Purdue Agric. Exp. Sta. Handbook*. 1965. V. 282. 15 p.

Received 30.07.2018

Revised 20.04.2019

Accepted 24.05.2019