

Физико-географические исследования

УДК 551.435 (470.51)

М.Ю. Зайцева, И.И. Рысин

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКОРОСТИ РОСТА ОВРАГОВ В УДМУРТИИ¹

Данное исследование направлено на построение прогноза скорости роста оврагов в Удмуртии с использованием методов математического моделирования. В качестве исходного материала отобраны пять временных рядов, характеризующих среднюю скорость линейного роста оврагов за период с 1978 по 2017 гг. Овраги группировались по географическому принципу и генезису. В рамках данной работы предпринята попытка построения среднесрочного прогноза для периода 2018–2022 г. В качестве основы для работы с исходными временными рядами был выбран анализ Фурье. Результаты полученных моделей наглядно отображены в виде графиков. Последующий регрессионный анализ подтвердил достоверность полученной модели, по крайней мере, для четырех из пяти групп оврагов. Однако, при сопоставлении полученных прогнозных значений с фактически измеренными в 2018 г. выяснилось, что данная модель не может учитывать возможных экстремальных значений прироста отдельных оврагов в группе.

Ключевые слова: овражная эрозия, Удмуртия, прогнозирование, математические методы моделирования, линейный прирост оврагов, анализ Фурье.

DOI: 10.35634/2412-9518-2019-29-3-383-393

Овражная эрозия является одним из наиболее активных рельефообразующих процессов на территории республики, нередко вызывающих негативные последствия в виде сокращения пахотных земель, разрушения инженерных коммуникаций и сооружений. История изучения процессов оврагообразования в Удмуртской Республике (УР), основанная в первую очередь на полустационарных исследованиях оврагов на 28-ми ключевых участках, начинается с 1978 г. В систему мониторинга включены две большие группы оврагов – агрогенные и техногенные, то есть все они так или иначе своим происхождением обязаны хозяйственной деятельности человека. По местоположению в рельефе овраги делятся на первичные и вторичные. Среди первичных для территории республики выделяют приводораздельные, придолинные и прибалочные, а среди вторичных – вершинные, донные и пойменные [1].

Очевидно, что наряду с текущими полевыми исследованиями овражной эрозии немаловажно владеть и опережающей информацией о характере процесса на ближайшие годы, что может способствовать своевременному принятию экономических и экологических мер по предотвращению неблагоприятных последствий. Стоит отметить, что прогнозирование процессов овражной эрозии для УР посредством математического моделирования выполнялось и ранее для периодов 1997–2003 гг. и 2012–2016 гг. [1-3]. Результаты прогнозирования подтверждались последующими измерениями линейного роста оврагов в полевых условиях.

В литературе чаще известны попытки разработки динамической модели развития оврагов, построенные на основе измерения параметров его эрозионного вреза, скорости размыва дна и аккумуляции наносов, при этом рассчитываются гидравлические характеристики потока и размываемость грунтов [4-6]. Как в России, так и за рубежом широко применяются и экспериментальные модели развития оврагов [7-9].

Целью настоящей работы является построение математико-статистической модели динамики развития оврагов по временным рядам средних годовых приростов оврагов за период с 1978 по 2017 г. и расчет прогнозных значений роста оврагов на ближайшие пять лет.

Материалы и методы исследования

Для данного исследования среди оврагов, включенных в систему мониторинга по УР, отобраны пять временных рядов, состоящих из последовательности упорядоченных во времени числовых показателей среднегодовой скорости линейного прироста.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РНФ № 15-17-20006.

Выборка оврагов для анализа производилась прежде всего по географическому принципу, то есть для всех оврагов в группе характерны схожие геоморфологические и гидрометеорологические условия. Затем для каждой локации подбирались овраги с характерными признаками роста, относящимися по положению в рельефе к одному типу. Вследствие климатических изменений и характера землепользования на овражных водосборах в последние годы многие из наблюдаемых оврагов перестали расти [10], поэтому не растущие в течение 5 и более лет овраги были исключены из анализа. Таким образом, для анализа было отобрано пять групп, каждая из которых включает от 4 до 10 оврагов.

Первая группа состоит из четырех донных оврагов на ключевом участке «Большое Волково», расположенном в Вавожском административном районе УР. В геоморфологическом отношении он приурочен к левому склону долины р. Валы, осложненному долиной ее небольшого притока – р. Итчи. Исследуемые овраги развиваются в днищах голоценовых балок и размывают балочный аллювий супесчано-суглинистого состава.

Вторая группа включает пять донных оврагов на ключевом участке «Черная – Светлое», расположенном в Воткинском районе УР, на правом склоне долины р. Чернушки, осложненном долиной ее безымянного притока. Указанные овраги также развиваются в днищах древних эрозионных форм и размывают супесчано-суглинистый комплекс балочных отложений.

В третью группу первичных оврагов включены два типа: четыре приводораздельных и шесть придолинных оврагов, расположенных на ключевых участках близ г. Ижевска, в Завьяловском районе УР («Ижевск-1»). Два приводораздельных оврага находятся на ключевом участке «Мещеряки», по одному оврагу на участках «Юськи» и «Забегалово». Три придолинных оврага находятся на ключевом участке «Докша» и по одному на участках «Макарово», «Забегалово» и «Ст. Мартьяново». Все овраги активно развиваются, за исключением двух оврагов на участке «Забегалово», которые в 2014–2017 гг. имели нулевой прирост, и оврага на участке «Ст. Мартьяново», который в последние три года не имел прироста. Овраги данной группы размывают различные по литологическому составу группы пород, включая делювиально-солифлюкционные суглинки и коренные верхнепермские отложения.

В четвертую группу вторичных включены два типа: пять вершинных и один донный овраг, развивающихся на ключевых участках близ г. Ижевска, в Завьяловском районе УР («Ижевск-2»). Два вершинных оврага находятся на ключевом участке «Макарово» и по одному оврагу на участках «Юськи», «Забегалово», «Поваренки». Донный овраг расположен на участке «Юськи». В отличие от первичных, все выделенные овраги активно развиваются и размывают супесчано-суглинистые балочные отложения или комплекс четвертичных и верхнепермских отложений.

В пятую группу первичных оврагов входят три прибалочных и два придолинных оврага ключевого участка «Мазунино», расположенного в Сарапульском районе УР, на правом склоне долины р. Камы, осложненном долинами ее притоков и густой овражно-балочной сетью. В эту же группу включен приводораздельный овраг, развивающийся на участке «Девятово», который находится в этом же районе. Все выделенные в данной группе овраги активно развиваются. Придолинные овраги размывают преимущественно коренные верхнепермские глины с прослоями более прочных пород (известняков, мергелей, аргиллитов, песчаников и т.п.). Прибалочные и вершинный овраги размывают здесь четвертичные делювиально-солифлюкционные суглинки.

Графики отобранных временных рядов линейного прироста оврагов за исследуемый 40-летний период отображены на рис. 1.

Результаты и их обсуждение

Прежде всего необходимо оценить возможность применения единой математической модели прогноза для всех временных рядов, переменными в которых являются средние скорости роста оврагов за год. С этой целью проведен первичный кросскорреляционный анализ, позволяющий выявить степень выраженности связей между исходными временными рядами (табл. 1). По полученным значениям коэффициентов корреляции Пирсона отмечаем среднюю, а в некоторых случаях и сильную зависимость анализируемых рядов, в связи с чем можем считать возможным применение для них единой математической модели.

Построение прогноза оврагообразования производилось на основе одной математической модели для всех выделенных временных рядов с использованием анализа Фурье, сущность которого сводится к преобразованию периодических функций в ряд тригонометрических уравнений, называемых гармониками [11-13]. Далее приведем алгоритм математического моделирования.

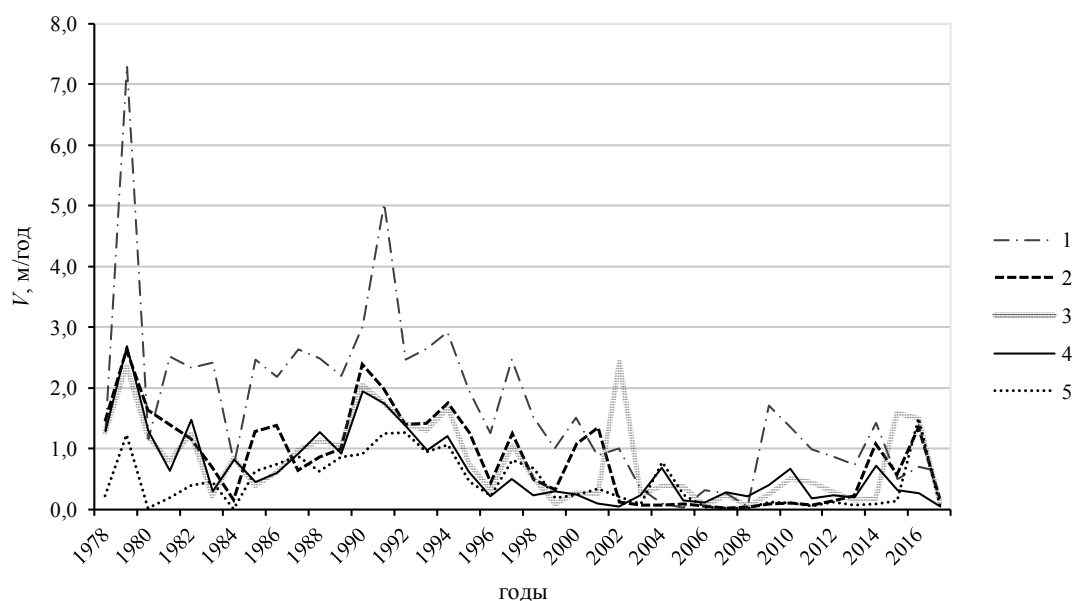


Рис. 1. Графики среднегодового прироста по выделенным группам оврагов: 1 – «Большое Волково», 2 – «Черная – Светлое», 3 – «Ижевск-1», 4 – «Ижевск-2», 5 – «Девятово – Мазунино»

Таблица 1

Корреляционная матрица зависимостей временных рядов

Временной ряд	Большое Волково	Черная – Светлое	Ижевск-1	Ижевск-2	Девятово – Мазунино
Большое Волково	1	0,77	0,60	0,80	0,65
Черная – Светлое	0,77	1	0,64	0,76	0,66
Ижевск-1	0,60	0,64	1	0,69	0,60
Ижевск-2	0,80	0,76	0,69	1	0,56
Девятово – Мазунино	0,65	0,66	0,60	0,56	1

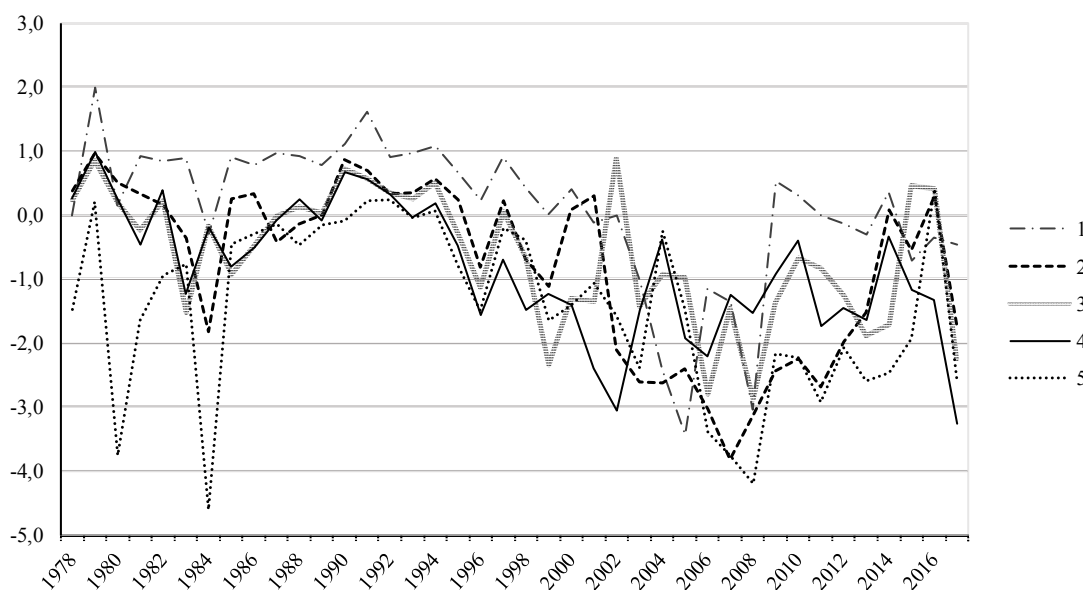


Рис. 2. Ряды логарифмов $y(t)$ временных рядов: 1 – «Большое Волково», 2 – «Черная – Светлое», 3 – «Ижевск-1», 4 – «Ижевск-2», 5 – «Девятово – Мазунино»

Таблица 2

Ряды логарифмов среднегодового прироста оврагов по выделенным группам

t	Годы	Временной ряд				
		Большое Вол- ково	Черная - Свет- лое	Ижевск-1	Ижевск-2	Девятово - Мазунино
1	1978	0,253	0,373	0,233	0,259	-1,470
2	1979	1,990	0,966	0,856	0,990	0,212
3	1980	0,148	0,496	0,185	0,255	-3,758
4	1981	0,924	0,338	-0,230	-0,462	-1,652
5	1982	0,847	0,157	0,224	0,385	-0,946
6	1983	0,881	-0,365	-1,528	-1,238	-0,773
7	1984	-0,291	-1,820	-0,171	-0,194	-4,605
8	1985	0,901	0,253	-0,934	-0,802	-0,462
9	1986	0,777	0,324	-0,483	-0,511	-0,306
10	1987	0,971	-0,431	-0,020	-0,091	-0,134
11	1988	0,912	-0,146	0,129	0,244	-0,473
12	1989	0,786	0,000	0,037	-0,091	-0,151
13	1990	1,104	0,870	0,716	0,664	-0,098
14	1991	1,616	0,685	0,562	0,554	0,217
15	1992	0,901	0,331	0,345	0,321	0,234
16	1993	0,974	0,344	0,255	-0,037	-0,053
17	1994	1,073	0,562	0,511	0,184	0,066
18	1995	0,676	0,230	-0,304	-0,481	-0,799
19	1996	0,231	-0,816	-1,127	-1,561	-1,499
20	1997	0,906	0,223	0,041	-0,693	-0,203
21	1998	0,424	-0,697	-0,666	-1,492	-0,396
22	1999	0,005	-1,121	-2,343	-1,238	-1,652
23	2000	0,407	0,071	-1,306	-1,400	-1,420
24	2001	-0,119	0,302	-1,359	-2,390	-1,069
25	2002	0,000	-2,104	0,888	-3,065	-1,577
26	2003	-1,036	-2,604	-1,427	-1,492	-2,390
27	2004	-2,408	-2,631	-0,926	-0,381	-0,244
28	2005	-3,427	-2,408	-0,973	-1,920	-1,455
29	2006	-1,155	-3,037	-2,797	-2,207	-3,401
30	2007	-1,357	-3,817	-1,465	-1,255	-3,758
31	2008	-3,047	-3,124	-2,882	-1,529	-4,200
32	2009	0,534	-2,430	-1,374	-0,916	-2,177
33	2010	0,300	-2,244	-0,671	-0,396	-2,238
34	2011	-0,008	-2,688	-0,826	-1,743	-2,931
35	2012	-0,134	-1,981	-1,255	-1,448	-2,079
36	2013	-0,301	-1,532	-1,890	-1,635	-2,590
37	2014	0,349	0,071	-1,720	-0,340	-2,465
38	2015	-0,708	-0,552	0,460	-1,171	-1,931
39	2016	-0,357	0,294	0,406	-1,322	0,408
40	2017	-0,470	-1,715	-2,254	-3,261	-2,547

Имеем пять временных рядов последовательных значений линейного прироста оврагов $x(1), x(2), \dots, x(40)$. Для них характерно содержание двух основных элементов: тенденции динамики и случайно распределенной во времени изменчивости. Наличие последней говорит о влиянии на переменные временного ряда большого комплекса независимых или слабосвязанных между собой факторов, влияющих на процессы овражной эрозии. На первом этапе исследования произведено логарифмирование значений временных рядов $y(t) = \ln x(t)$, $t = 1, 2, \dots, 40$, результаты которого сведены в табл. 2, а также отображены на рис. 2.

Далее для каждого временного ряда $y(t)$ выделяем линейный тренд:

$$y(t) = a \cdot t + b + z(t), \quad (1)$$

где a, b – коэффициенты линейного тренда, $z(t)$ – остатки временного ряда, $t = 1, \dots, 40$.

Для полученных остатков $z(t)$ была построена автокорреляционная функция, показавшая наличие сезонной составляющей у временного ряда $z(t)$. Под автокорреляцией понимают корреляцию внутри одного и того же временного ряда, но с разными сдвигами во времени. Существенное ее значение позволяет говорить о наличии тренда. В качестве аппроксимирующего ряда определим гармоническую составляющую $g(t, T, \varphi)$ по следующему принципу.

Зафиксируем период гармонической функции T из возможных значений от 2 до 20 включительно. В силу того, что ряд состоит из 40 значений, периоды, большие чем 20, рассматривать не имеет смысла. Обозначим $p = \left[\frac{T}{2} \right]$, $q = \left[\frac{T-1}{2} \right]$, где $\left[\frac{T}{2} \right]$ – целая часть числа $\frac{T}{2}$. Определим гармоническую частоту соответствующего спектра:

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{T}, \quad k = 1, 2, \dots, p. \quad (2)$$

Тогда гармоническая функция определяется по формуле:

$$g(t, T, \varphi) = \sum_{k=1}^p a_k \cdot \cos(\omega_k(t + \varphi)) + \sum_{k=1}^q b_k \cdot \sin(\omega_k(t + \varphi)), \quad (3)$$

где $\{a_k\}, \{b_k\}$ – коэффициенты гармонической функции, φ – фаза сдвига периодической функции $g(t, T, \varphi)$.

С учетом линейного тренда прогнозная модель имеет следующий вид:

$$y_{\text{прог}}(t) = a \cdot t + b + g(t, T, \varphi). \quad (4)$$

Для каждого из возможных значений T и φ методом наименьших квадратов подбираются коэффициенты линейного тренда a, b и коэффициенты гармонической функции $\{a_k\}, \{b_k\}$.

В качестве критерия для выбора периода T и фазы φ была применена метрика MSE (mean squared error), то есть средний квадрат ошибки, определяемый по формуле:

$$MSE = \frac{1}{40} \sum_{t=1}^{40} (y(t) - y_{\text{прог}}(t))^2. \quad (5)$$

Возведение в квадрат ошибки прогноза позволяет подчеркнуть грубые ошибки, в результате чего выбираем ту модель, для которой значение среднеквадратичной ошибки MSE стремится к нулю. Анализ показал, что значение фазы φ не влияет на выбор минимального значения MSE , поэтому в дальнейшем принимаем $\varphi = 0$. Оптимальный период гармонической функции оказался равен для временных рядов «Большое Волково», «Черная – Светлое» и «Ижевск-2» – 20, для «Девятово – Мазунино» – 19, для «Ижевск-1» – 18.

Для построения прогноза используем значения выписанной аппроксимирующей модели $y_{\text{прог}}(t)$ в точках $t = 41, \dots, 45$. Потенцируя полученные прогнозные значения $y_{\text{прог}}(t)$, получаем оценку значений роста оврагов на ближайшие пять лет:

$$x_{\text{прог}}(t) = \exp(y_{\text{прог}}(t)). \quad (6)$$

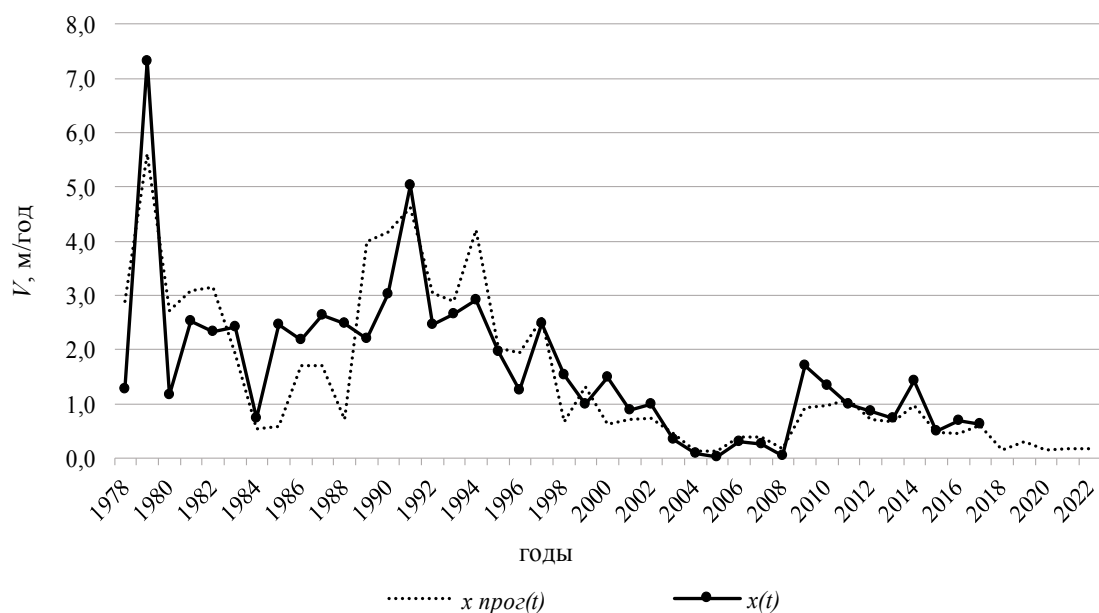
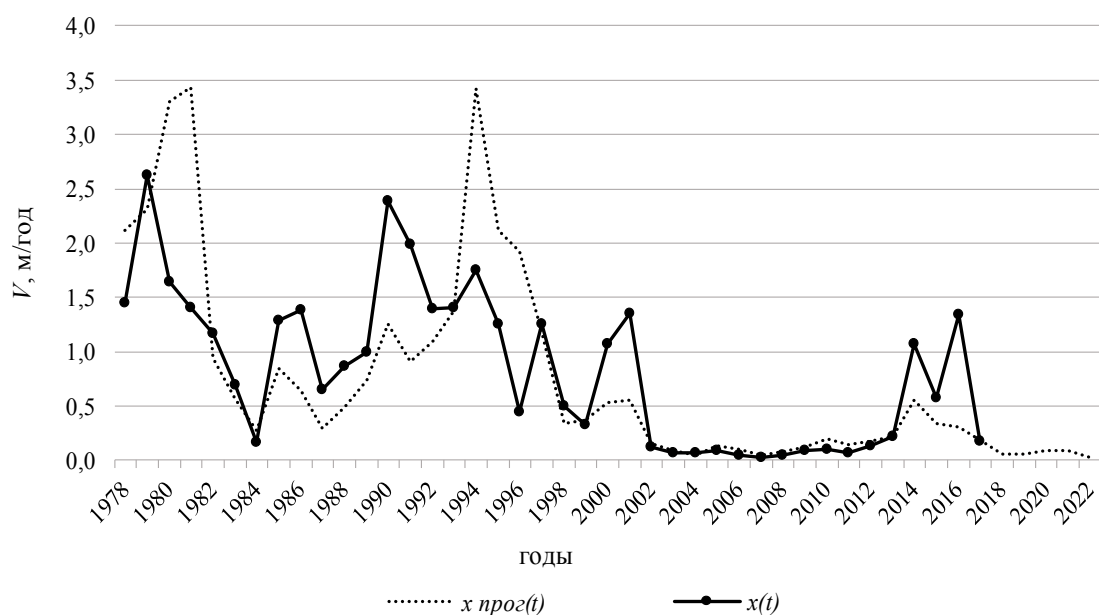
Полученные результаты моделирования и прогнозирования исходных временных рядов отражены на графиках (рис. 3-7).

Полученные прогнозные значения рядов для 2018-2022 гг., представленные в табл. 3, свидетельствуют о сохранении средней скорости роста оврагов на крайне низком уровне.

Таблица 3

Прогноз среднегодовой скорости роста оврагов (м/год)

t	Годы	Временной ряд				
		Большое Волково	Черная – Светлое	Ижевск-1	Ижевск-2	Девятово – Мазунино
41	2018	0,158	0,055	0,159	0,065	0,016
42	2019	0,306	0,060	0,065	0,106	0,051
43	2020	0,149	0,086	0,392	0,068	0,086
44	2021	0,169	0,089	0,084	0,029	0,073
45	2022	0,172	0,024	0,135	0,031	0,007

Рис. 3. Графики темпов среднегодового прироста оврагов группы «Большое Волково»: $x(t)$ – фактически измеренных в полевых условиях, $x_{прог}(t)$ – прогнозируемыхРис. 4. Графики темпов среднегодового прироста оврагов группы «Черная-Светлое»: $x(t)$ – фактически измеренных в полевых условиях, $x_{прог}(t)$ – прогнозируемых

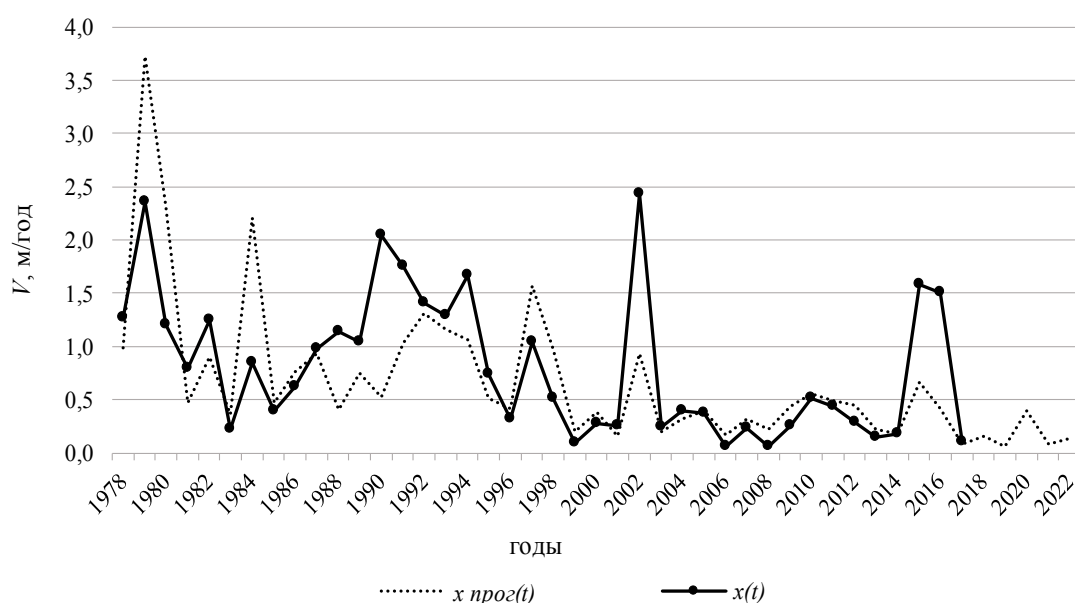


Рис. 5. Графики темпов среднегодового прироста оврагов группы «Ижевск-1»: $x(t)$ – фактически измеренных в полевых условиях, $x_{prog}(t)$ – прогнозируемых

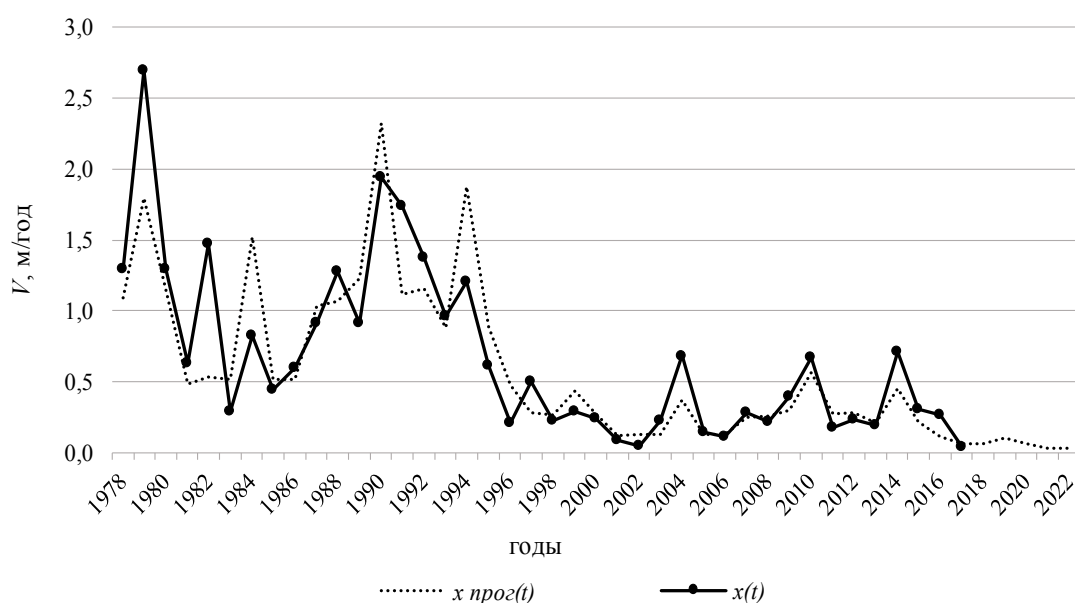


Рис. 6. Графики темпов среднегодового прироста оврагов группы «Ижевск-2»: $x(t)$ – фактически измеренных в полевых условиях, $x_{prog}(t)$ – прогнозируемых

Для каждого построенного прогнозного временного ряда был проведен анализ качества модели на основе статистики линейной регрессии, результаты которого сведены в табл. 4. Целесообразно производить расчет параметров линейной регрессии с использованием функции «ЛИНЕЙН» в MS Excel [14]. Рассчитаны следующие показатели: коэффициент детерминации (R^2), стандартная ошибка (se_y), критерий Фишера (F), число степеней свободы (Df), p -уровень значимости (p -value), регрессионная сумма квадратов (ss_{reg}), остаточная сумма квадратов (ss_{resid}).

Как видно из табл. 4, значения коэффициентов детерминации довольно высоки, то есть полученные модели данных адекватно описывают поведение прогнозируемой переменной. Так для группы «Ижевск-2» имеем, что 81% от всей вариации зависимой переменной обусловлен вариацией объясняющей переменной. Однако отметим, что величина R^2 для группы «Девятово–Мазунино» оказалась небольшой. Аналогичные выводы можем сделать по значению стандартной ошибки (se_y), являющейся убывающей функцией объема выборки: чем меньше стандартная ошибка, тем более достоверной является оценка.

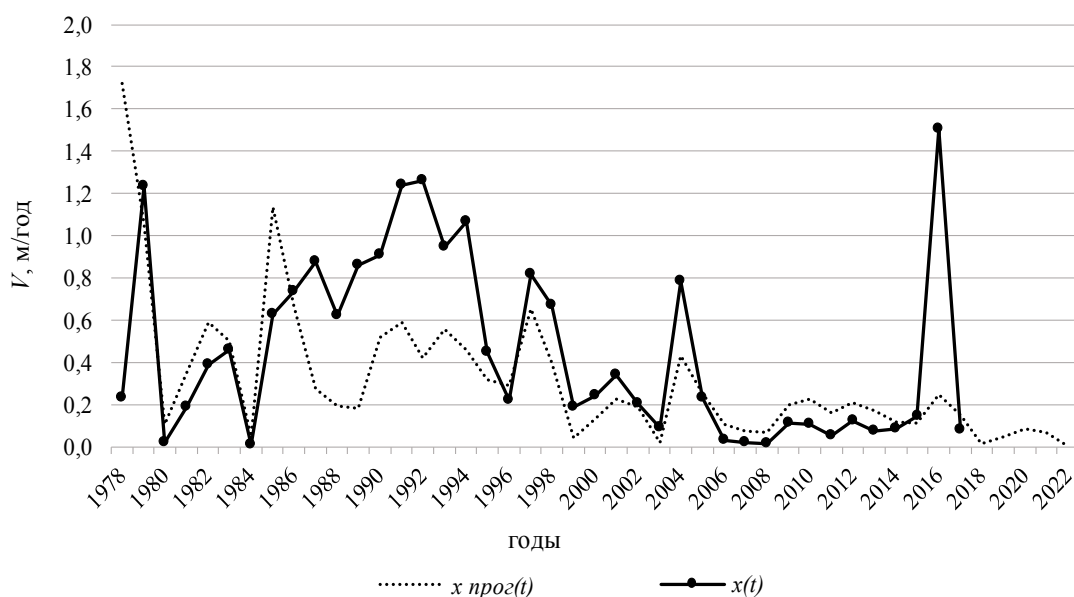


Рис. 7. Графики темпов среднегодового прироста оврагов группы «Девятово–Мазунино»: $x(t)$ – фактически измеренных в полевых условиях, $x_{prog}(t)$ – прогнозируемых

Таблица 4

Статистика линейной регрессии

Группа	Показатели						
	R^2	se_y	F	Df	p -value	ss_{reg}	ss_{resid}
Большое Волково	0,74	0,827	2,769	19	0,015	37,85	12,98
Черная – Светлое	0,79	0,891	3,476	19	0,004	55,21	7,62
Ижевск-1	0,63	0,840	2,022	21	0,062	25,56	14,74
Ижевск-2	0,81	0,630	3,951	19	0,002	31,70	7,62
Девятово – Мазунино	0,48	1,347	0,990	20	0,506	34,13	36,26

F -критерий Фишера рассчитывается как отношение дисперсии исходного временного ряда и несмещенной оценки дисперсии остаточной последовательности для модели. Для всех групп оврагов, за исключением «Девятово – Мазунино», расчетное значение данного критерия оказалось выше табличного ($F_{расч} > F_{табл}$), поэтому можем сделать вывод о значимости уравнения регрессии (связь доказана).

Число степеней свободы (Df), отражающее количество значений в вычислении статистики, способных варьироваться, необходимо знать для расчета p -value. P -уровень значимости показывает вероятность ошибки при отклонении нулевой гипотезы, то есть так же, как и в случае со стандартной ошибкой, чем меньше его величина, тем меньше вероятность ошибки.

И наконец, остаточная (необъясненная) сумма квадратов отклонений (ss_{resid}) оказалась существенно ниже регрессионной (ss_{reg}), то есть объясненной, что также подтверждает качество регрессии для четырех из пяти временных рядов.

Таблица 5

Сопоставление прогнозных и фактически измеренных значений среднегодового прироста оврагов за 2018 г. (м/год)

Показатель	Временной ряд				
	Большое Волково	Черная – Светлое	Ижевск-1	Ижевск-2	Девятово – Мазунино
$x_{prog}(t)$	0,158	0,055	0,159	0,065	0,016
$x(t)$	3,160	0,160	0,285	0,260	0,563

По полученным данным статистики линейной регрессии можем судить о приемлемости примененной математической модели. Сомнения вызывает лишь группа «Девятово – Мазунино», для которой не совсем удачная статистика построенной модели может быть обусловлена существенным статистическим выбросом показателя в 2016 г.

При полевых экспедиционных исследованиях в 2018 г. были измерены величины линейного прироста анализируемых оврагов. В табл. 5 представлены результаты их сопоставления с прогнозируемыми значениями.

Для всех групп оврагов фактические значения прироста в 2018 г. оказались в той или иной степени выше прогнозируемых. Однако для групп «Черная – Светлое», «Ижевск-1» и «Ижевск-2» превышение незначительное, что позволяет говорить о подтверждении прогноза. Относительно большому среднему приросту в группе «Девятово – Мазунино» поспособствовал один из оврагов, вершина которого за год отступила на 2,3 м. Особенно большой оказалась разница между прогнозируемым и фактическим значениями в группе «Большое Волково», так как свою роль внес овраг, линейный прирост которого в 2018 г. составил 11,3 м, что для территории УР в последние десятилетия является редкостью.

Выводы

Предложенная математическая модель для прогнозирования средней скорости роста оврагов, согласно результатам регрессионного анализа, является наиболее адекватной для групп «Большое Волково», «Черная – Светлое», «Ижевск-2» и в меньшей степени – для «Ижевск-1». Весьма сомнительными могут быть данные по группе оврагов «Девятово – Мазунино», для которых не совсем удачная статистика построенной модели может быть обусловлена существенным статистическим выбросом показателя в 2016 г. На основании результатов сопоставления прогнозных значений на 2018 г. и фактически измеренных в полевых условиях было установлено, что прогноз не может учитывать возможных экстремальных значений прироста отдельных оврагов в анализируемых группах, обусловленных, как правило, непредсказуемым техногенным фактором. Для более адекватного прогнозирования процессов оврагообразования на ближайшую перспективу необходимо провести математико-статистический анализ совместно с динамическими факторами, среди которых наибольшее влияние оказывают гидрометеорологические условия и хозяйственная деятельность человека.

Благодарности

Авторы признательны доктору физико-математических наук, профессору А.В. Лётчикову, при активном участии которого проведено данное исследование. Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РФФ № 15-17-20006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рысин И.И. Овражная эрозия в Удмуртии. Ижевск: Изд-во Удм. ун-та, 1998. 274 с.
2. Лётчиков А.В., Рысин И.И., Чиркова Л.С. Прогнозирование овражной эрозии во времени // Процессы и экологическая обстановка в бассейнах малых рек. Ижевск: Изд-во Удм. ун-та. 2000. С. 87-94.
3. Рысин И.И., Григорьев И.И. Модель прогнозирования скорости роста оврагов в Удмуртии // Вестн. Удм. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2013. Вып. 3. С. 106-114.
4. Sidorchuk A. et. al. Soil Erosion Modelling in the Mbuluzi River Catchment (Swaziland, South Africa). Part 1. Modelling of the dynamic evolution of gullies. // Geogr. Phys. Dynam. Quat. 2001. Vol. 24. P. 177-187.
5. Sidorchuk A. et. al. Gully erosion modelling in semiarid catchment of Southern Africa // Catena. 2003. Vol. 50. P. 507-525.
6. Эрозионно-русловые системы: монография / под ред. Р.С. Чалова, В.Н. Голосова, А.Ю. Сидорчука. М.: ИНФРА-М, 2017. 702 с.
7. Экспериментальная геоморфология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. Вып. 3. 148 с.
8. Зорина Е.Ф. Овражная эрозия: закономерности и потенциал развития. М.: ГЕОС, 2003. 170 с.
9. Karimov V., Sheshukov A. Modeling of ephemeral gully erosion with a physically-based soil hydrology model // Submitted Abstracts of 7th International Symposium on Gully Erosion (May 23–27, 2016. Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA). Purdue University, 2016. P. 35-36.
10. Рысин И.И., Голосов В.Н., Григорьев И.И., Зайцева М.Ю. О причинах современного сокращения темпов роста оврагов в Удмуртии // Геоморфология. 2018. № 1. С. 75-87.

11. Brillinger D.R. Time Series Data Analysis and Theory. San Francisco: SIAM, 2001. 561p. (Russ. ed.: Brillinger D. *Vremennye ryady. Obrabotka dannyh i teoriya*. Moscow: Mir (Publ.), 1980. 536 p.).
12. Kendall M.G. Time Series. London: Chas. Griffin & Co., 1973. 197 p. (Russ. ed.: Kendall M. *Vremennye ryady*. Moscow: *Finansy i statistika* (Publ.), 1981. 191 p.).
13. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Основы эконометрики: учебник для вузов: в 2 т. 2-е изд., испр. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. 432 с.
14. Вадзинский Р.Н. Статистические вычисления в среде Excel. М.: Питер, 2008. 602 с.

Поступила в редакцию 23.08.2019

Зайцева Мария Юрьевна, инженер 1 категории
 ЗАО «Ижевский нефтяной научный центр»
 426011, Россия, г. Ижевск, ул. Свободы, 173
 E-mail: zaitseva_geo@mail.ru

Рысин Иван Иванович, доктор географических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»
 426034, Россия, г. Ижевск, ул. Университетская, 1 (корп. 1)
 E-mail: rysin@udsu.ru

M.Yu. Zaitseva, I.I. Rysin

FORECASTING THE GROWTH RATE OF GULLIES IN THE UDMURT REPUBLIC

DOI: 10.35634/2412-9518-2019-29-3-383-393

The present study is aimed at forecasting the processes of gullyerosion in the Udmurt Republic using the methods of mathematical modeling. Five time series characterizing the average linear growth rate of gullies for the period from 1978 to 2017 were selected as a source material. Gullies were grouped according to the geographical principle and genesis. As part of this work, it is expected to build a medium-term forecast for the period 2018–2022. Fourier analysis was chosen as the basis for working with the initial time series. The results of the obtained models are graphically displayed. Subsequent regression analysis confirmed the validity of the model for at least four of the five groups of gullies. However, when comparing the obtained forecast values with those actually measured in 2018, it turned out that this model could not take into account the possible extreme values of the growth of individual gullies in the group.

Keywords: Udmurtia, gully erosion, forecasting, mathematical modeling methods, linear growth of gullies, Fourier analysis.

REFERENCES

1. Rysin I.I. *Ovrazhnaya eroziya v Udmurtii* [Gully erosion in Udmurtia], Izhevsk: Udmurt.Gos.Univ., 1998, 274 p. (in Russ.).
2. Letchikov A.V., Rysin I.I., Chirkova L.S. [Prediction of gully erosion], in *Protsessy i ekologicheskaya obstanovka v bassejnah malyh rek*. Izhevsk, 2000, pp. 87-94 (in Russ.).
3. Rysin I.I., Grigor'ev I.I. [Prediction model for the growth rate of ravines in Udmurtia], in *Vestnik Udmurtskogo Univ. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle*, 2013. no.2, pp. 106-114 (in Russ.).
4. Sidorchuk A. et. al. Soil Erosion Modelling in the Mbuluzi River Catchment (Swaziland, South Africa). Part 1. Modelling of the dynamic evolution of gullies. *Geogr. Phys. Dinam. Quat.*, 2001, vol. 24, pp. 177 – 187.
5. Sidorchuk A. et. al. Gully erosion modelling in semiarid catchment of Southern Africa. *Catena*, 2003, vol. 50, pp. 507-525.
6. *Eroziionno-ruslovye sistemy* [Erosion-channel system], Chalov R.S., Golosov V.N. and Sidorchuk A.Yu. (ed.), Moscow: INFRA-M Publ., 2017, 702 p. (in Russ.).
7. *Eksperimental'naya geomorfologiya* [Experimental geomorphology], Moscow: Moscow State University Publ., 1978, vol. 3, 148 p. (in Russ.).
8. Zorina E.F. *Ovrazhnaya eroziya: zakonomernosti i potentsial razvitiya* [Gully erosion: regularities and potential of development], Moscow: GEOS Publ., 2003, 170 p. (in Russ.).
9. Karimov V., Sheshukov A. Modeling of ephemeral gully erosion with a physically-based soil hydrology model. *Submitted Abstracts of 7th International Symposium on Gully Erosion* (May 23-27, 2016. Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA). Purdue University, 2016, pp. 35 – 36.

10. Rysin I.I., Golosov V.N., Grigor'ev I.I., Zaytseva M.Yu. [On the causes in the contemporary decline in the gully head retreat rates in Udmurtia], in *Geomorphologia*, 2018, no. 1, pp. 75-87 (in Russ.).
11. Brillinger D.R. Time Series Data Analysis and Theory. San Francisco, SIAM, 2001. 561p. (Russ. ed.: Brillinger D. *Vremennye ryady. Obrabotka dannyh i teoriya*. Moscow: Mir Publ., 1980. 536 p.).
12. Kendall M.G. Time Series. London: Chas. Griffin & Co., 1973. 197 p. (Russ. ed.: Kendall M.G. *Vremennye ryady*. Moscow: Finansy i statistika (Publ.), 1981. 191 p.).
13. Ayvazyan S.A. *Prikladnaya statistika. Osnovy ekonometriki: uchebnyk dlya vuzov* [Applied statistics. Fundamentals of econometrics: textbook for universities], Moscow: YuNITI-DANA Publ., 2001, 432 p. (in Russ.).
14. Vadzinskiy R.N. *Statisticheskie vychisleniya v srede Excel* [Statistical calculations in Excel program software], Moscow: Piter Publ., 2008, 602 p. (in Russ.).

Received 23.08.2019

Zaitseva M.Yu., engineer of the first category
JSC "Izhevsk Oil Research Center"
Svobody st., 173, Izhevsk, Russia, 426011
E-mail: zaitseva_geo@mail.ru

Rysin I.I., Doctor of Geography, Professor
Udmurt State University
Universitetskaya st., 1/1, Izhevsk, Russia, 426034
E-mail: rysin@udsu.ru