

УДК 631.432.3

А. В. Жуков¹, Г. А. Задорожная², И. В. Лядская¹¹Днепропетровский государственный аграрный университет²Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ПАТТЕРНЫ ИНФИЛЬТРАЦИИ ПОЧВЫ НА СКЛОНЕ БАЛКИ

Приведены результаты изучения пространственной изменчивости скорости инфильтрации почвы на склоне степной балки. Установлено, что в пределах склона средняя скорость инфильтрации в верхней трети достоверно ниже, чем в средней и нижней третях. В средней и нижней третях склона скорости инфильтрации статистически достоверно не различаются. Скорость инфильтрации демонстрирует пространственно определенные паттерны изменчивости. Нижняя треть склона существенно отличается по степени пространственной детерминированности процесса инфильтрации. Пространственные паттерны и средние уровни инфильтрации можно объяснить как следствие различной организации системы трещин в почве, которая возникает как результат геоморфологического крипа.

Ключевые слова: инфильтрация, крип, геостатистика, пространственная изменчивость

Определение водно-физических свойств почвы является важным шагом в понимании динамики воды и транспорта растворенных веществ в почвенной матрице [7]. К их числу относятся скорость инфильтрации, ненасыщенная водная проводимость и сорптивность [11]. Пространственная изменчивость таких почвенных свойств, как механический состав, структура, содержание экстрагируемых форм P, Ca, Mg, Fe оказывают влияние на скорость инфильтрации почвы [10].

После попадания на поверхность почвы вода атмосферных осадков перераспределяется рельефом, растительностью, почвенной биотой [1]. Характер механической обработки почвы оказывает существенное влияние на её водно-физические свойства. Методом трубок Качинского была установлена вертикальная неоднородность водопроницаемости пахотной почвы [1]. В горизонтальном направлении при опробовании с лагом 0,5 м наблюдаются пространственные структуры с радиусом влияния 3–3,5 м в пахотной почве [11].

Динамика структуры и сложения почвы наблюдается также в естественных условиях. При перемещении почвы по склонам балок (крип) может наблюдаться возникновения трещин, которые способны существенно изменять водно-физические свойства почв посредством формирования дополнительных преимущественных потоков влаги в почве [6]. Массовое смещение почвогрунтов на склонах в общем виде складывается из двух процессов: во-первых, гидротермически обусловленных смещений грунта (крип) и, во-вторых, течения грунта вязкотекучей консистенции (солифлюкция). Крип имеет в основе вертикальные гидротермические движения грунта, которые обуславливаются колебаниями объема материала при фазовых переходах воды (криогенный крип), изменениях увлажненности (гидрогенный крип) и температуры (термогенный крип) [5]. В комплексе факторов, влияющих на интенсивность крипа, выделяются те, которые оказывают влияние на набухание-усадку почвы и подстилающих пород. На уровне процессов почвообразования следствием крипа можно считать педотурбационные элементарные почвообразовательные процессы, а именно растрескивание [4]. Растрескивание – процесс интенсивного сжатия почвенной массы на значительную глубину при её

обсыхании с образованием вертикальных и горизонтальных трещин. Края крупных вертикальных трещин постепенно обсыпаются, вниз попадает материал из верхних горизонтов. Таким образом, крип может создавать специфические пространственные структуры почвы и грунтов в пределах склонов балки, которые в свою очередь могут модулировать динамику водно-физических свойств почв.

В задачи исследования входило изучить пространственную изменчивость интенсивности инфильтрации на склоне степной балки.

Материал и методы. Экспериментальные полигоны заложены на склоне балки Каменистой (восточная окраина г. Днепропетровска, 48°23'11"С.Ш., 48°23'11"В.Д.). Склон юго-восточной экспозиции со средним уклоном 13°. По направлению вниз по склону балки (перпендикулярное направлению тальвега балки) были заложены 3 полигона. Средний из полигонов находится в зоне наибольшего изгиба склона балки – «лба» и условно обозначен как находящийся в средней трети склона. Выше от него в 15 м расположен полигон с условным обозначением как находящийся в верхней трети. Этот полигон находится в зоне выполаживания склона и перехода его в плакор. Ниже среднего полигона на 15 м находится третий полигон с условным обозначением как находящийся в нижней трети склона. Для этого полигона характерен высокий уклон, но практически нулевая кривизна рельефа.

Каждый из полигонов представляет собой совокупность из ряда точек с интервалом 30 см (ось абсцисс, направлена вдоль склона, 7 точек). Таких рядов 15, они расположены с интервалом 40 см (ось ординат, перпендикулярно склону). Полигоны своими основаниями расположены на склоне балки и при увеличении координат по оси ординат заходят в локальную ложбину на склоне – папиляр стока [3]. Скорость инфильтрации измеряли с помощью трубок с переменным напором воды (трубки Качинского) [2]. Трубки изготовлены из пластика высотой 12 см и 3 см диаметром. На 2 см трубка погружалась в почву и заливалась водой по верхнему уровню (начальный напор воды – 10 см). После экспозиции 1 час в трубке измерялся оставшийся уровень воды. В каждом полигоне было произведено измерение в 105 трубках.

Тип растительности, представленный в пределах балки – разнотравно-типчаково-ковыльняная степь. В растительном покрове представлено 52 вида сосудистых растений. Доминирующими являются овсяница валисская (*Festuca valesiaca*), пырей ползучий (*Elytrigia repens*), ковыль волосатик (*Stipa capillata*), молочай степной (*Euphorbia stepposa*), тимьян Маршалла (*Thymus marschallianus*). Проективное покрытие растительности – 30–60%. По фитоиндикационным шкалам Д. Н. Цыганова [8] термоклимат экотопа можно оценить как суббореальный/неморальный ($Tm = 8,92$, $44,6$ ккал/см² год), континентальность – материковая ($Kп = 9,69$), омброклимат – субаридный ($Om = 7,11$, $P-E = -168,21$ мм/год, P -осадки мм/год, E -испарение мм/год), криоклимат – умеренных зим/мягких зим ($Kг = 8,09$, средняя температура самого холодного месяца – $-7,18^\circ$), влажность – лугово-степной тип, экологическая группа – влажно-степная ($Hд = 9,16$), режим общего засоления и трофности почв – богатые почвы ($Tг = 9,39$), азотное питание – очень бедные азотом / бедные азотом почвы ($Nт = 4,87$), кислотность почвы – слабокислые /нейтральные почвы ($Rс = 8,29$), световой режим – открытых /полуоткрытых пространств (субсветовой) ($Lс = 2,73$).

Почвы – чернозём обыкновенный слабоэродированный, плотность – $1,30$ г/см³, электропроводность – $0,59$ дСм/см, твердость – от $2,02$ МПа в слое 0–5 см до $2,60$ МПа в слое 45–50 см (измерения 26 апреля 2013 г.). Плотность почвы в верхнем 10-см слое составляет $1,24$ г/см³ верхней трети склона, $1,15$ г/см³ – в средней, $0,98$ г/см³ – в нижней. Наименьшая влагоемкость – $19,47$, $21,44$ и $22,54$ %

соответственно. Коэффициент структурности – 4,19 (верхняя треть), 3,16 (средняя треть) и 2,43 (нижняя треть).

Оценка степени пространственной зависимости переменных проведена с помощью показателя SDL (*spatial dependence level*), или пространственного отношения:

$$SDL = (100 * C_0 / (C_0 + C_1)),$$

где C_0 – наггет-эффект, C_1 – частичный порог (эти статистики находятся из вариограммы).

Численное значение SDL изменяется от 0 до 100 %. Если пространственное отношение находится в пределах 0–25 %, то речь идет о сильной пространственной зависимости; если пространственное отношение находится в пределах 25–75 %, то в таком случае пространственная зависимость переменной является умеренной; если пространственное отношение превышает 75 %, то переменная рассматривается как слабо пространственно зависимая [9].

Вычисления произведены с помощью программы Statistica 7.0, геостатистическое оценивание и построение карт – с помощью программы Surfer 11.4.

Результаты и обсуждение. Полученные результаты свидетельствуют о том, что наибольшая скорость инфильтрации характерна для средней трети склона (табл. 1). Несколько меньше этот показатель для нижней трети и наименьший – в верхней трети. Показатель скорости инфильтрации в верхней трети склона достоверно отличается от показателей в средней и нижней третях склона. Достоверных различий между средней и нижней третями нет.

1. Статистические характеристики скорости инфильтрации ($N = 105$)

Участок профиля	Влажность почвы, %	Среднее, мм/час	Доверительный интервал		CV, %
			– 95 %	+ 95 %	
Верхняя треть	5,52±0,49	53,17	50,23	56,11	28,54
Средняя треть	3,61±0,37	63,00	59,15	66,86	31,60
Нижняя треть	4,32±0,59	61,20	57,08	65,32	34,80

Коэффициент вариации скорости инфильтрации закономерно увеличивается при продвижении вниз по склону. Для того, чтобы выяснить наличие пространственной компоненты изменчивости скорости инфильтрации воды был проведен анализ вариограмм (рис. 1).

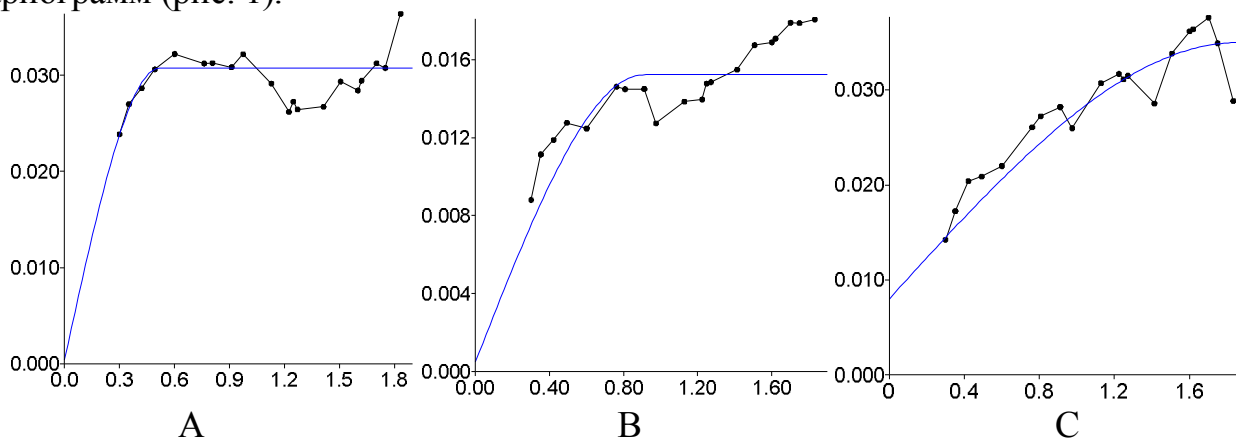


Рис. 1. Вариограмма пространственного распределения скорости инфильтрации (А – верхняя треть склона; В – средняя; С – нижняя)

Полученные вариограммы позволяют оценить геостатистики, которые описывают изучаемый процесс (табл. 2).

2. Геостатистические параметры скорости инфильтрации (сферическая модель)

Участок профиля	$C_0 \cdot 10^3$ (Наггет)	C_1 (Частичный порог)	$C_0 + C_1$ (Порог)	SDL, %	Радиус влияния, м
Верхняя треть	0,36	30,38	30,74	1,17	0,53
Средняя треть	0,52	14,70	15,22	3,42	1,14
Нижняя треть	8,00	27,00	35,00	22,86	1,88

Полученные данные свидетельствуют о том, вариация скорости инфильтрации воды подчиняется сильной пространственной зависимости в верхней и средней третях склона (показатель SDL составляет 1,17 и 3,42 соответственно). В нижней трети пространственную зависимость скорости инфильтрации можно отнести к категории умеренной. Закономерно изменяется радиус влияния вариограмм. Этот показатель наименьший в верхней трети, а наибольший – в нижней трети склона.

На основании процедуры кригинга были построены карты изменчивости скорости инфильтрации в изученных полигонах (рис. 1).

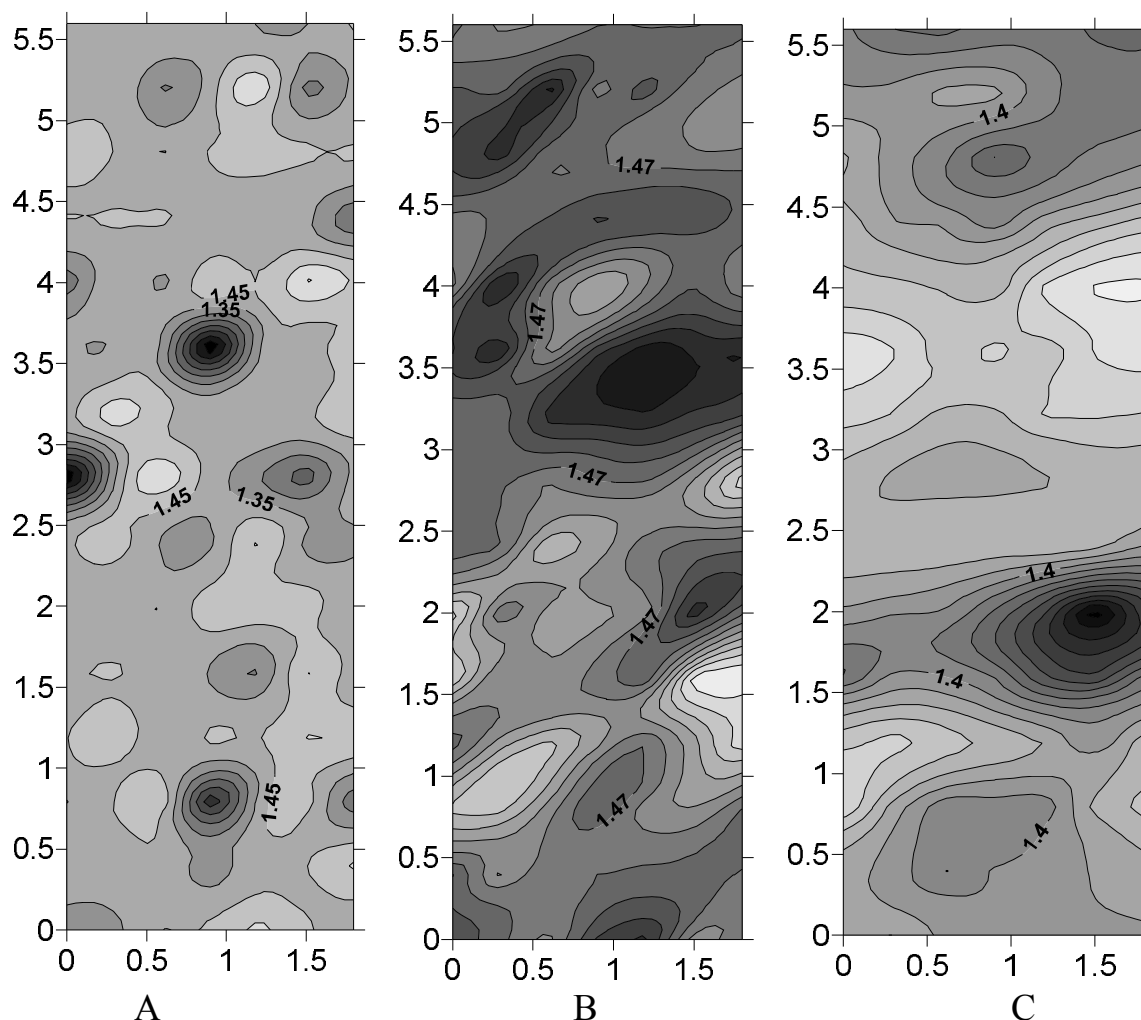


Рис. 1. Пространственная изменчивость скорости инфильтрации чернозема обыкновенного на склоне балки (в логарифмическом масштабе)
(А – верхняя треть склона; В – средняя; С – нижняя)

Визуальная оценка полученных карт позволяет выявить локалитеты в пределах полигонов с повышенной скоростью инфильтрации. Форма этих участков, их площадь и взаимное расположение существенно отличается между полигонами. В верхней трети локалитеты с повышенной скоростью инфильтрации имеют

относительно не большие размеры и ограничены участками со средней и низкой скоростью инфильтрации. В средней трети размеры локалитетов с высокой скоростью инфильтрации увеличиваются, вследствие чего локалитеты сливаются в сообщающиеся структуры. Мостики сообщения представлены почвой с высокой либо средней скоростью инфильтрации. В нижней трети участки с высокой скоростью инфильтрации представляют собой сплошные поля, которые конкурируют по значимости с участками с низкой и средней скоростью инфильтрации.

Для правильной интерпретации полученных результатов необходимо учесть специфику геостатистического моделирования. В верхней трети нагетт-эффект очень низок, что свидетельствует о возможности точного отображения пространственной структуры изучаемого явления с помощью выбранной схемы опробования. Иначе говоря, пробы отбирались достаточно часто. Радиус влияния указывает на протяженность пространственной взаимосвязи скорости инфильтрации. В верхней трети, как это указывалось, этот показатель наименьший. Пространственная взаимосвязь явления говорит о его неслучайном расположении в пространстве, что позволяет формировать гипотезу о механизме его формирования. Можно предположить, что участки с повышенной инфильтрацией маркируют преференциальные водные потоки [6]. Возникновение трещин в почве может способствовать значительному увеличению скорости инфильтрации. Тогда организация порового пространства почвы (в особенности трещин) будет определять картину пространственной изменчивости скорости инфильтрации. На склоне балки геоморфологический крип (сползание почвогрунтов) может оказывать существенное влияние на формирование трещин в почве.

В верхней трети крип невелик и трещины в почве преимущественно возникают в результате набухания-усадки. Взаимодействие между частями почвенного тела охватывает протяженность несколько сантиметров. Удаление от зоны образования трещины существенно влияет на инфильтрационную динамику.

В средней трети степень крипа увеличивается. Вероятно появление трещин нескольких порядков. Трещины формируют сложную конфигурацию и в данной точке пространства происходит наложение воздействий трещин различного порядка. В геостатистических показателях это проявляется как увеличение нагетт-эффекта (компонента изменчивости вне данной пространственной модели) и увеличении радиуса влияния. Радиус влияния возрастает как результат увеличения масштабов трещин первого порядка, а нагетт-эффект – как результат увеличения роли трещин более низких порядков.

В нижней трети происходит четкая дифференциация участка на две зоны с высокой скоростью инфильтрации (центральная часть) и низкой скоростью инфильтрации (периферия). Такая конфигурация отражается в высоком значении нагетт-эффекта, что может быть расценено как возможное наличие более тонкой структуры на масштабном уровне меньше выбранного способа опробования и в высоком значении радиуса влияния как результат практически трендового изменения скорости инфильтрации. Вероятно, высокий уровень крипа в нижней трети склона приводит к некоторому разрушению системы трещин в результате чего скорость инфильтрации несколько уменьшается.

Выводы. 1. В пределах склона средняя скорость инфильтрации в верхней трети достоверно ниже, чем в средней и нижней третях. В средней и нижней третях склона скорости инфильтрации статистически достоверно не различаются. 2. Скорость инфильтрации демонстрирует пространственно определенные паттерны изменчивости. Нижняя треть склона существенно отличается по степени

пространственной детерминированности процесса инфильтрации. 3. Пространственные паттерны и средние уровни инфильтрации можно объяснить как следствие различной организации системы трещин в почве, которая возникает как результат геоморфологического крипа.

Библиографический список: 1. Бігун О. М. Дослідження водопроникності та волого провідності порового простору чорнозему різного характеру використання / О. М. Бігун // Агрохімія і ґрунтознавство. – 2009. – Вип. 72. – С. 15–25. 2. Вадюнина А. Ф. Методы исследования физических свойств почв / А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина. – М.: Агропромиздат, 1986. – 416 с. 3. Полупан М. І Природний механізм захисту схилових ґрунтів від водної ерозії / [М. І. Полупан, С. А. Балюк, В. Б. Соловей та ін.]; за ред. М. І. Полупана. – К.: Фенікс, 2011. – 144 с. 4. Розанов Б. Г. Морфология почв / Б. Г. Розанов. – М.: Академический Проект, 2004. – 432 с. 5. Рысин И. И. Первые результаты изучения гидротермического крипа на территории Удмуртии / И. И. Рысин // Вестн. Удм. ун-та. Сер. «Науки о Земле». – Ижевск, 2003. – С. 81–101. 6. Умарова А. Б. Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв / А. Б. Умарова. – М.: ГЕОС, 2011. – 266 с. 7. Шеин Е. В. Курс физики почв / Е. В. Шеин. – М.: МГУ, 2005. – 432 с. 8. Цыганов Д. Н. Фитоиндикация экологических факторов в подзоне хвойно-широколиственных лесов / Д. Н. Цыганов. – М.: Наука, 1983. – 198 с. 9. Cambardella C. A. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils / C. A. Cambardella, T. B. Moorman, J. M. Novak, Parkin, et al. // Soil Science Soc. Am. – 1994. – Vol. 58. – P. 1501–1511. 10. Chien Y. J. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils / Y. J. Chien, D. Y. Lee, H. Y. Guo, K. H. Houngh // Soil Sci. – 1997. – Vol. 162. – P. 291–298. 11. Sepaskhah A. R. Geostatistical analysis of sorptivity for a soil under tilled and no-tilled conditions / A. R. Sepaskhah, S. H. Ahmadi, A. R. Nikbakht Shahbazi // Soil & Tillage Research. – 2005. – Vol. 83. – P. 237–245.

О. В. Жуков, Г. О. Задорожна, І. В. Лядська

ПРОСТОРОВІ ПАТЕРНИ ІНФІЛЬТРАЦІЇ ҐРУНТУ НА СХИЛІ БАЛКИ

Наведено результати вивчення просторової мінливості швидкості інфільтрації ґрунту на схилі степової балки. Установлено, що в межах схилу середня швидкість інфільтрації у верхній третині вірогідно нижче, ніж у середній і нижній третинах. У середній і нижній третинах схилу швидкості інфільтрації статистично вірогідно не розрізняються. Швидкість інфільтрації демонструє просторово визначені патерни мінливості. Нижня третина схилу істотно відрізняється за рівнем просторової детермінованості процесу інфільтрації. Просторові паттерни та середні рівні інфільтрації можна пояснити як наслідок різної організації системи тріщин у ґрунті, яка виникає як результат геоморфологічного крипу.

Ключові слова: інфільтрація, крип, геостатистика, просторова мінливість.

A. V. Zhukov, G. A. Zadorozhnaja, I. V. Ljadskaja

SPATIAL PATTERNS OF THE SOIL INFILTRATION ON A VALLEY SLOPE

Results of studying of spatial variability of infiltration intensity of the soils on a slope of a steppe valley have been shown in the present paper. Average infiltration intensity in the top third part of the slope has been found established as confidentially low than in middle and bottom thirds ones. In middle and bottom thirds of slope of infiltration intensity do not differ statistically. Infiltration intensity has been shown as characterized by spatial patterns of variability. The bottom third of slope essentially differs on degree of spatial determinancy of infiltration process. The spatial patterns and the average levels of the infiltration may be explained as consequence of the different organisation of system of cracks in soil which arises as result geomorphological creep.

Keywords: infiltration, creep, geostatistics, spatial variability.