

УДК 551.4.012:551.435.8 (470.323)

© 2019 г. С.А. САДКОВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ РАВНИН С
РАЗВИТИЕМ ПРОСАДОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ПОДХОДОВ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОРФОЛОГИИ ЛАНДШАФТОВ***Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН, Москва, Россия
E-mail: sersadkov@gmail.com*

Поступила в редакцию 04.10.2016

После доработки 26.04.2018

Принята к печати 09.10.2018

На примере ключевого участка в западной части Среднерусской возвышенности (Курская область) показана возможность моделирования морфологической структуры территорий с развитием просадочных процессов на основе подходов математической морфологии ландшафтов. Обоснована применимость такого моделирования к равнинам с развитием просадочных процессов и установлены объективные трудности, связанные с усложненной морфологической структурой территории, по сравнению с предложенными ранее каноническими моделями (в терминологии, принятой в ландшафтоведении). Рассмотрен случай одновременного развития на территории понижений разных морфологических типов с их дифференциацией по морфометрическим и физико-географическим признакам, с последующим анализом отдельных типов. Методом дисперсионного анализа установлены достоверные различия морфометрических характеристик залесенных и незалесенных понижений, а также пониженных участков территории без морфологически выраженного понижения (“пятен вымокания”). Для незалесенных понижений подтверждено сходство распределения средних радиусов понижений с логнормальным распределением, для “пятен вымокания” выявлено сходство с нормальным распределением, выборка средних радиусов залесенных понижений демонстрирует сходство с распределениями обоих видов.

Ключевые слова: просадочность, лёссовые породы, дистанционное зондирование, математическая морфология ландшафтов.

<https://doi.org/10.31857/S0435-42812019148-58>

**MORPHOLOGICAL STRUCTURE OF PLAINS SUBJECT TO GROUND
SUBSIDENCE ON THE BASIS OF MATHEMATICAL MORPHOLOGY
OF LANDSCAPES APPROACH****S.A. SADKOV***E.M. Sergeev Institute of Geoecology RAS, Moscow, Russia
E-mail: sersadkov@gmail.com*

Received 04.10.2016

Revised 26.04.2018

Accepted 09.10.2018

S u m m a r y

Possibility for landscape pattern modeling was demonstrated for areas characterized by active ground subsidence in the eastern part of the Middle Russian Upland (the Kursk Region) as a case study, based on the mathematical morphology of landscapes technique. Applicability of this approach for the case study area was

substantiated. The investigation revealed objective difficulties caused by complex morphological pattern of the area compared with the previously proposed canonical models (in terms of the landscape science). The simultaneous occurrence of morphometrically and physiographically different types of the depressions was considered with subsequent analysis of particular types. Significant differences in morphometric characteristics of forested and meadow depressions as well as low areas without morphologically distinct depressions (so-called “wet spots”) have been found by the application of the variance method. Correspondence of the meadow depressions mean radius sample distribution with log-normal distribution and of the “wet spots” one with normal distribution have been revealed. The forested depressions mean radius sample shows correspondence with both types of statistical distributions.

Keywords: soil subsidence, loess, remote sensing, mathematical morphology of landscapes.

Введение

Исследования массивов лёссовых пород позволяют оценить современные особенности их строения, состава и свойств, восстановить историю формирования этих свойств и предсказать поведение лёссовых пород при хозяйственном освоении территории [1]. В настоящее время разработаны эффективные методики исследования просадочных свойств грунтов, например [2, 3]. Однако они ограничены по возможному территориальному охвату и требуют затрат на выполнение полевых изысканий и лабораторных исследований. В связи с этим актуальным является привлечение к решению этих задач данных дистанционного зондирования (ДДЗ).

Одним из возможных путей анализа ДДЗ является использование подходов математической морфологии ландшафтов (ММЛ) — направления ландшафтоведения, изучающего количественные закономерности построения мозаик, которые образованы на земной поверхности природно-территориальными комплексами, и разрабатывающего методы математического анализа этих мозаик [4]. Задача данной статьи — оценка перспективы использования подходов ММЛ для получения дополнительной информации о развитии просадочного процесса (на примере ключевого участка на территории Курской области).

Материалы и методы

Исследования проводились на субгоризонтальном слабо расчлененном линейной эрозией участке на границе Льговского и Курчатовского районов Курской области, неподалеку от дер. Ольшанка (рис. 1).

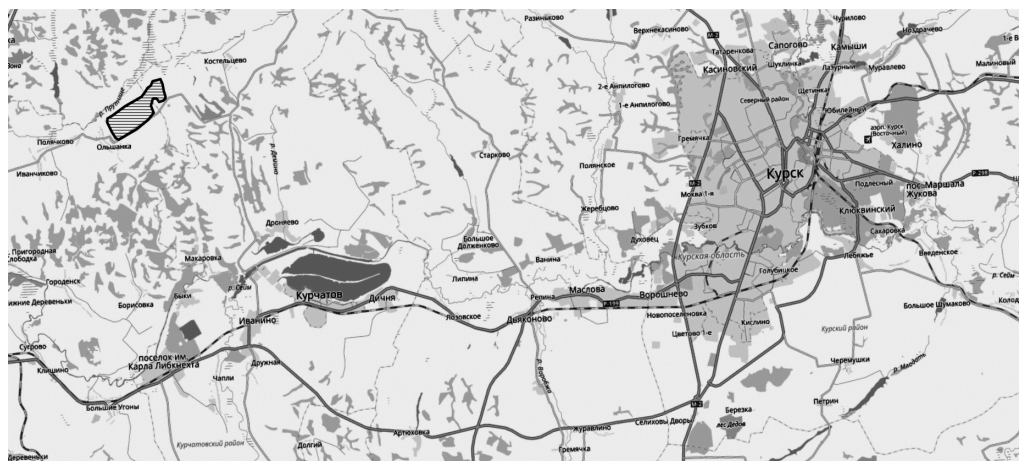


Рис. 1. Расположение района исследования (заштрихованная зона с черной границей)

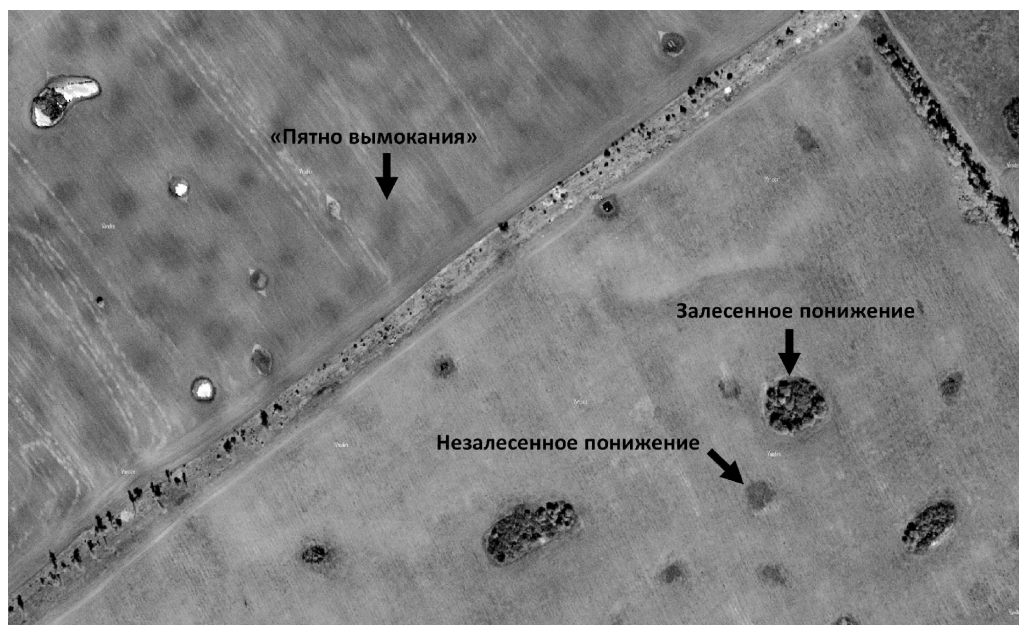


Рис. 2. Изображение фрагмента ключевого участка на космическом снимке

Участок находится на севере Курского поднятия, в линейной зоне его сопряжения с Прутищенским прогибом, которому соответствует современная долина р. Прутище. Он расположен в пределах Среднерусской возвышенности с эрозионно-денудационным холмисто-увалистым рельефом и принадлежит к Среднерусской геоморфологической провинции [5]. На рассматриваемом участке развиты эрозионно-денудационные поверхности выравнивания, перекрытые лёссовыми породами [6]. Поверхность сложена лёссовидными суглинками мощностью до 30 м, перекрывающими суглинистые аллювиальные отложения верхних террас р. Прутище [7]. Просадочный процесс развивается на поверхности междуречий и речных террасах, не затронутых овражной эрозией. Эти участки сильнее всего преобразованы человеком: до 90–95% их площади распаханно [8], вследствие чего на них развивается смыв почв в отрицательные формы микрорельефа [9].

На основе анализа морфологии рельефа и растительного покрова выявлены следующие 3 типа понижений:

- залесенные понижения диаметром порядка 30–40 м округлой формы с хорошо выраженными бровкой, бортами и днищем;
- незалесенные понижения диаметром 20–25 м округлой формы со слабо выраженными бровкой, бортами и днищем;
- «пятна вымокания» — округлые или сложной формы слабо выраженные понижения без четких бортов и днища, с границами, выделяемыми по тону снимка на распаханых участках и слабо различимыми на целине (рис. 2).

Основным методом исследования ландшафтного рисунка являлось вероятностное моделирование с последующей статистической верификацией. Ландшафтный рисунок равнины с развитием просадочных процессов можно представить как набор округлых понижений, случайно расположенных на субгоризонтальной поверхности с однородным строением рельефа и отложений. Свойства такого ландшафтного рисунка описываются базовой (канонической) моделью ландшафтного рисунка равнин с развитием просадочных процессов (в соответствии с терминологией, принятой в ландшафтоведении) [4, 10]. В нашем

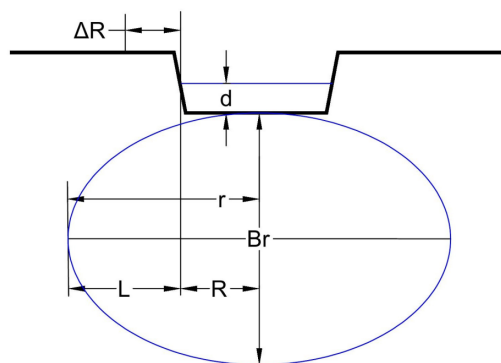


Рис. 3. Схематическое изображение зоны замачивания при местном (точечном) замачивании

R — текущий радиус понижения,
 d — высота столба воды в понижении,
 L — ширина распространения замачивания за границу понижения,
 Br — глубина замачивания,
 ΔR — прирост радиуса понижения в данном цикле замачивания

исследовании использована схожая модель, основанная на следующих предположениях.

1. Понижения формируются независимо друг от друга в течение короткого отрезка времени; вероятность возникновения понижений на пробной площадке зависит только от ее площади, при этом для небольшой площадки вероятность возникновения нескольких понижений пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью возникновения одного понижения.

2. Рост радиуса возникших понижений вследствие уплотнения просадочной толщи происходит на разных понижениях независимо, причем величина его пропорциональна дальности распространения замачивания за пределы существующей границы понижения (рис. 3):

$$\Delta R = k_1(r - R), \quad (1)$$

где ΔR — расширение зоны просадки в данном цикле замачивания, k_1 — постоянный коэффициент, зависящий от свойств грунта, r — радиус зоны замачивания, а R — радиус просадочного понижения.

3. Зона замачивания имеет форму эллипсоида вращения, касающегося дна понижения своей вершиной и симметричного относительно вертикальной оси, проходящей через его центр (рис. 3).

4. Объем зоны замачивания V_R пропорционален объему воды, участвующей в замачивании V_w :

$$V_R = k_2 V_w, \quad (2)$$

а мощность зоны замачивания B_R пропорциональна высоте столба воды d внутри понижения:

$$d = k_3 B_R, \quad (3)$$

где k_2 и k_3 — постоянные коэффициенты, зависящие от свойств грунта.

Первое предположение соответствует существующим представлениям о механизме просадочного процесса, который при возникновении замачивания развивается быстро — в течение первых часов и дней [11]. Применительно к возникновению просадочных понижений на равнине в целом можно предположить, что период первоначального возникновения понижений занимает сравнительно непродолжительное время, вслед за этим следует относительно продолжительный этап их роста. Таким образом, при соответствующем сочетании геолого-геоморфологических и климатических условий, понижения возникают повсеместно в относительно короткие сроки.

Справедливость второго предположения следует из результатов исследований просадки грунта при замачивании сверху [2].

Третье предположение базируется на модели местного замачивания, не достигающего подошвы просадочной толщи [12]. Исходя из имеющихся данных о ее мощности в районе исследования [7] и глубине замачивания талыми и дождевыми водами [13], такой механизм замачивания представляется наиболее вероятным [12]. Небольшой частью зоны замачивания, лежащей непосредственно под днищем понижения, мы можем пренебречь.

Четвертое предположение основывается на результатах гидрогеологического моделирования местного замачивания [14].

Опираясь на принятые предположения, можно провести анализ протекающих процессов. Согласно [15], следствием первого из них является соответствие распределения числа понижений P на случайно выбранной площадке закону Пуассона:

$$P(k, s) = \frac{(\gamma s)^k}{k!} e^{-\gamma s}, \quad (4)$$

где γ – среднее число понижений на единицу площади, s – площадь пробной площадки, а k – случайный коэффициент, зависящий от свойств отложений.

Третье предположение приводит к простой формуле объема зоны замачивания V_R :

$$V_R = \frac{2}{3} \pi B_R r^2, \quad (5)$$

Объем влаги V_w , участвующий в замачивании, можно представить как произведение площади дна понижения πR^2 на высоту столба воды внутри понижения d . Согласно четвертому предположению, получаем:

$$r = R \sqrt{\frac{3}{2} k_2 k_3}. \quad (6)$$

Из второго предположения следует, что ширина распространения зоны замачивания за пределы существующего понижения радиусом R есть линейная функция этого радиуса:

$$r - R = R \left(\sqrt{\frac{3}{2} k_2 k_3} - 1 \right). \quad (7)$$

В соответствии со вторым предположением, величина приращения среднего радиуса понижения ΔR_j в течение j -го цикла замачивания при использовании данной модели будет определяться как:

$$\Delta R_j = R_j K_0 \xi_j^0, \quad (8)$$

где R_j – радиус понижения в начале j -го цикла, $K_0 = k_1 \left(\sqrt{\frac{3}{2} k_2 k_3} - 1 \right)$ – постоянный коэффициент, определяемый свойствами грунта, а ξ_j^0 – независимые случайные величины, учитывающие воздействие ряда случайных факторов, влияющих на связь плановых размеров зоны замачивания и роста размеров понижения, распределение которых не меняется во времени.

Разделив обе части этого уравнения на величину радиуса понижения в разные моменты времени R_j и заменив сумму в левой части интегралом, получаем [4]:

$$\int_0^T \frac{dR}{R} = K_0 \sum_{j=0}^T \xi_j^0, \quad (9)$$

где T – продолжительность роста понижений. Отсюда можно получить, что логарифм среднего радиуса просадочного понижения представляет собой сумму большого числа независимых случайных величин, то есть, согласно центральной предельной теореме, является случайной величиной, имеющей нормальное распределение. Таким образом, процесс роста понижений за счет местного замачивания можно приближенно рассматривать как марковский случайный процесс с непрерывным временем с переходной функцией:

$$f(R_0, R_t, t) = \frac{R_0}{\sigma K_0 R_t \sqrt{2\pi t}} e^{-\frac{\left(\ln \frac{R_t}{R_0} - a K_0 t\right)^2}{2\sigma^2 K_0^2 t}}, \quad (10)$$

где R_0 и R_t – размеры понижения в начале и в конце выбранного интервала времени, t – его продолжительность, а коэффициенты a и σ соответствуют параметрам распределения случайных величин ξ_j^0 . Если упростить данное выражение, принимая исходный радиус понижения за единицу, то среднее радиуса R_t в любой момент времени T после начала роста будет логнормально распределенной случайной величиной с функцией плотности вероятности:

$$f(R_T, T) = \frac{1}{\sigma K_0 R_T \sqrt{2\pi T}} e^{-\frac{(\ln R_T - a K_0 T)^2}{2\sigma^2 K_0^2 T}}. \quad (11)$$

Соответствие реального рисунка рельефа равнин с развитием просадочных процессов описанной модели проверялось путем тестирования двух статистических гипотез:

- 1) соответствия распределения числа центров понижений внутри случайно расположенных площадок пуассоновскому распределению;
- 2) соответствия распределения средних радиусов понижений логнормальному распределению.

Понижения и их центроиды (центры масс) выделялись путем визуального дешифрирования космических снимков сверхвысокого разрешения Pleiades-1A, находящихся в открытом доступе, в соответствии с методикой [16]. При различной морфологии рельефа понижений они выделялись в разные группы. В случае если на основании дешифрирования космических снимков и полевых работ можно было выделить несколько самостоятельных выборок из логарифмов средних радиусов понижений разных типов, их принадлежность к одной генеральной совокупности предварительно проверялась при помощи дисперсионного анализа [17].

Проверка первого предположения производилась путем подсчета центров понижений 100 случайно расположенных в пределах ключевого участка кругов, для четырех выборок с различным радиусом этих кругов. Радиусы равнялись R_s , $1.5R_s$, $2R_s$ и $3R_s$, где R_s – радиус круга площадью, равной отношению общей площади ключевого участка к числу понижений исследуемого типа в его пределах. Круги выбирались с помощью датчика случайных чисел. Далее проверялась гипотеза о согласии выборок с распределением Пуассона.

Для верификации моделей роста проводилась проверка на нормальность для выборок средних радиусов понижения и их логарифмов. Проверки проводились при помощи критерия Пирсона с использованием программы Statistica в соответствии с методикой [17, 18].

Полевые работы на ключевом участке были осуществлены летом 2015 г. Они включали комплексное описание территории с характеристикой морфологических особенностей рельефа и отбор образцов грунта с сохранением структуры на основной поверхности речной террасы и в центральной части существующих понижений различных морфологических типов, отбор проводился с глубины 1 м по методике [19].

Таблица 1

Результаты определения гранулометрического состава грунтов ключевого участка

№ выработки*	Тип поверхности	Глубина отбора, м	Наименование грунта	Гранулометрический состав								
				Содержание частиц различного размера (в мм), %								
				>0.5	0.5–0.25	0.25–0.1	0.1–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.002	0.002–0.001	<0.001
1044	За пределами понижения	1.3	Суглинок полутвердый	0.3	3.2	2.8	15.7	50.3	6.5	1.0	1.9	18.3
1053	Залесенные понижения	1.2		0.4	4.9	4.5	12.1	44.6	11.8	1.2	5.2	15.3
1062	Незалесенные понижения	1.2		0.2	1.0	1.1	17.7	50.2	8.6	0.7	3.3	17.2

*—номера маршрутных точек.

Таблица 2

Результаты определения просадочности грунтов ключевого участка

№ выработки	Тип поверхности	Глубина отбора, м	Начальное просадочное давление, МПа	Относительная просадочность при давлении, МПа				
				0.05	0.1	0.2	0.3	0.4
1044	За пределами понижения	1.3	0.097	0.006	0.011	0.018	0.025	0.031
1053	Залесенные понижения	1.2	0.052	0.010	0.015	0.020	0.023	0.028
1062	Незалесенные понижения	1.2	0.061	0.009	0.014	0.022	0.029	0.035

На камеральном этапе были проведены лабораторные испытания отобранных образцов грунта в лаборатории изучения состава и свойств грунтов ИГЭ РАН согласно [20]. Лабораторные испытания показали, что грунты на поверхности ключевого участка — это суглинки с преобладанием алевритистой фракции (44–51%), практически лишенные песка (табл. 1). Все исследованные грунты являются просадочными, со сходными величинами коэффициента относительной просадочности. Значение начального просадочного давления в пределах понижений на 30–40% ниже, чем на основной поверхности. Таким образом, исследованные понижения могут иметь просадочное происхождение, хотя для однозначного подтверждения однородности территории, требуемой моделью, этих данных все же недостаточно (табл. 2).

Результаты и обсуждение

Верификация статистических распределений показала почти полное отсутствие сходства с пуассоновским для всех выборок, содержащих “пятна вымокания”. Для всех выборок из залесенных и незалесенных понижений, взятых как по отдельности, так и совместно, такое сходство встречается регулярно (табл. 3, рис. 4а).

Сопоставление выборок средних радиусов при помощи дисперсионного анализа обнаружило значимые различия между любыми двумя взятыми попарно выборками их логарифмов, относящимся к разным морфологическим типам понижений (рис. 4б). Таким образом, хотя отдельные значения средних радиусов (и их

Результаты статистической проверки соответствия распределений параметров просадочных понижений базовой модели с использованием критерия Пирсона на уровне значимости 0.95

Проверяемая выборка просадочных понижений	Число просадочных понижений	Значение p^* для разных распределений					
		средние радиусы		пуассоновское кол-во просадочных понижений (площадки разных размеров)			
		логнормальность	нормальность	R_s	$1,5R_s$	$2R_s$	$3R_s$
Вся выборка	190			0.000	0.000	0.009	0.000
Залесенные и незалесенные	121			0.263	0.398	0.768	0.567
Залесенные	49	0.801	0.779	0.001	0.561	0.250	0.285
Незалесенные	72	0.181	0.010	0.970	0.651	0.171	0.000
“Пятна вымокания”	69	0.033	0.194	0.022	0.000	0.011	0.000

* - в таблице даны величины p -дополнений до единицы квантилей, отвечающих вычисленному значению критерия Пирсона; гипотеза выполняется на уровне 0.95, если приведенная величина больше 0.05. Соответствующие значения выделены жирным шрифтом.

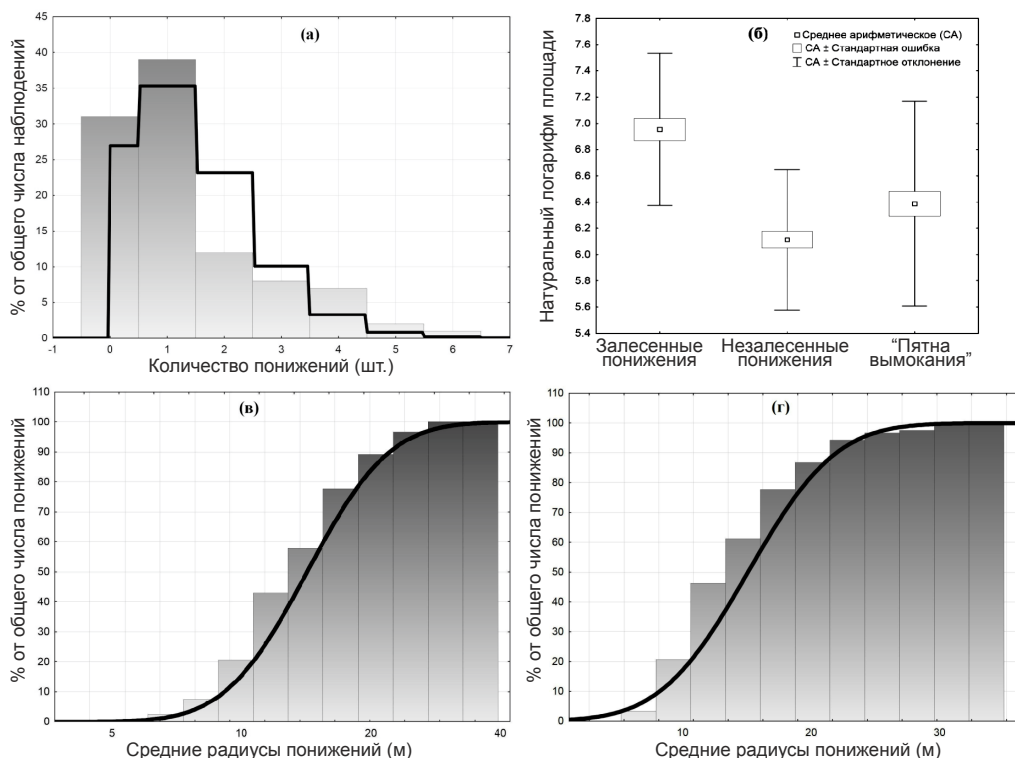


Рис. 4. Результаты статистической проверки распределения параметров ландшафтного рисунка (а) – соответствие распределения числа центров залесенных понижений внутри круга радиусом R пуассоновскому распределению; (б) – дисперсионный анализ распределения логарифмов средних радиусов понижений разных типов (1 – среднее арифметическое (CA), 2 – CA ± стандартная ошибка, 3 – CA ± стандартное отклонение); соответствие распределения средних радиусов залесенных понижений законам распределения: (в) – логнормальному, (г) – нормальному. Столбчатая диаграмма отражает фактическое распределение числа центров понижений, средних радиусов и их логарифмов, а линия графика – их теоретическое распределение по тому или иному закону

логарифмов) залесенных и незалесенных понижений, а также “пятен вымокания” могут совпадать, эти выборки принадлежат к различным генеральным совокупностям и должны анализироваться отдельно [17]. Верификация распределений средних радиусов показала их сходство на уровне 0.95 с логнормальным распределением для случаев залесенных и незалесенных понижений; сходство с нормальным распределением встречается для выборок залесенных понижений и “пятен вымокания” (табл. 3, рис. 4в–г).

Таким образом, распределение центров залесенных и незалесенных понижений и распределение их средних радиусов в целом обнаруживают сходство с закономерностями, вытекающими из модели развития морфологической структуры территории с преобладанием просадочных процессов.

Сходство рисунка “пятен вымокания” с канонической моделью практически отсутствует, как с точки зрения взаимного расположения, так и с точки зрения распределения средних радиусов понижений. Это вполне согласуется с результатами полевых наблюдений: эти объекты не имеют выраженных границ и представляют собой понижения не очевидного для нас (возможно, структурного) генезиса, существовавшие на поверхности ключевого участка на момент начала роста понижений. В эти понижения происходил смыв поверхностного слоя почвы на пашне. На целине этот процесс активно не развивался, чем объясняется отсутствие таких объектов на космическом снимке.

Согласование распределений случайных величин в отдельных выборках со свойствами, предсказанными моделью, свидетельствует, что их можно рассматривать как проявления одного процесса, прошедшего через несколько точек бифуркации, на каждой из которых параметры закона роста размеров понижения менялись при сохранении вида закона. Условием этого перехода, возможно, является появление лесной растительности, которое в данной зоне может увеличивать инфильтрацию влаги в почву в 3–4 раза [13].

Встречающееся сходство распределений средних радиусов с нормальным законом (для залесенных понижений), однако, не позволяет полностью отбросить гипотезу об отсутствии связи между величиной прироста понижения и его существующим радиусом.

Выводы

1. Результаты исследования показывают, что морфологическая структура равнин с развитием просадочных процессов может быть охарактеризована на основе подходов математической морфологии ландшафта. В частности, можно на основе анализа взаимного расположения понижений и их размеров выявить, расположены ли они независимо друг от друга и по каким закономерностям может происходить их рост, в том числе различный по механизму для нескольких типов понижений в пределах одной территории.

2. В ходе моделирования обоснована связь между инженерно-геологической моделью просадочного процесса при местном замачивании и математической моделью развития морфологической структуры соответствующей территории.

3. Результаты верификации модели роста свидетельствуют о корректности разработанной модели для одного типа просадочных понижений (незалесенных), для залесенных понижений нельзя исключать другие варианты модели, свойства рисунка “пятен вымокания” не соответствуют предсказанным моделью. Эти выводы сделаны независимо от взаимного расположения просадочных понижений и наличия на одной территории понижений разных типов.

Благодарности. Автор выражает благодарность: М.В. Архиповой, А.В. Звереву и Т.Г. Гоникову (ИГЭ РАН) за помощь в проведении дешифрирования ДДЗ и

полевых исследований, Ф.С. Карпенко (ИГЭ РАН) и Ф.Е. Пономареву (РУДН) – за помощь в проведении лабораторных испытаний.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 14-17-00357.

Acknowledgements. The author is grateful to M.V. Arkhipova, A.V. Zverev and T.G. Gonikov (IEG RAS) for help in remote sensing data interpretation and field investigations, F.S. Karpenko (IEG RAS) and F.Ye. Ponomarev (PFUR) for help in laboratory research conducting.

The research is supported by the RSF, project No. 14-17-00357.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимов В.Т. Инженерная геология массивов лёссовых пород: Учебное пособие. М.: КДУ, 2007. 398 с.
2. Крутов В.И. Основания и фундаменты на просадочных грунтах. Киев: Будівельник, 1982. 224 с.
3. СНиП 2.02.01-83. Основания зданий и сооружений. 166 с.
4. Викторов А.С. Математическая морфология ландшафта. М.: ТРАТЕК, 1998. 180 с.
5. Национальный атлас России. М.: Роскартография, 2007. Т. 2. Природа. Экология. 495 с.
6. Макарова Н.В., Макеев В.М., Суханова Т.В., Дорожко А.Г., Коробова И.В., Карфидова Е.А. Новейшая тектоника и геодинамика юго-западного крыла Воронежской антеклизы // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2015. № 1. С. 10–19.
7. Величко А.А. Геологический возраст верхнего палеолита центральных районов Русской равнины. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 294 с.
8. Горохова Е.А., Михно В.Б. Современная структура и трансформация ландшафтов Курской области // Вестник Воронежск. гос. ун-та. Сер. Геогр. Геоэкол. 2011. № 2. С. 17–25.
9. Глазовская М.А. Денудационно-аккумулятивные структуры почвенного покрова как формы проявления педолитогенеза // Почвоведение. 2000. № 2. С. 134–147.
10. Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
11. Трофимов В.Т. Генезис просадочности лёссовых пород. М.: Изд-во МГУ, 1999. 271 с.
12. Крутов В.И., Ковалев А.С., Ковалев В.А. Проектирование и устройство оснований и фундаментов на просадочных грунтах. М.: Изд-во Ассоц. строит. ВУЗов, 2015. 544 с.
13. Василевская Л.А. Районирование по условиям формирования подземных вод Курской области // Изв. ЮЗ гос. ун - та. Сер. Техника и технологии. 2012. № 2–2. С. 251–254.
14. Аверьянов С.В. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод. М.: Колос, 1982. 237 с.
15. Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф. Справочник по теории вероятности и математической статистике. М.: Наука, 1985. 640 с.
16. Методическое руководство по инженерно-геологической съемке масштаба 1 : 200 000 (1 : 100 000 – 1 : 500 000). М.: Недра, 1978. 391 с.
17. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях: Уч. пособие для студентов ВУЗов. М.: ИЦ “Академия”, 2004. 416 с.
18. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 648 с.
19. ГОСТ 12071-2000 Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. 18 с.
20. ГОСТ 23161-2012 Грунты. Метод лабораторного определения характеристик просадочности. 15 с.

REFERENCES

1. Trofimov V.T. *Inzhenernaya geologiya massivov lyossovykh porod* (Loess rocks engineering geology) Moscow: KDU (Publ.), 2007. 398 p.
2. Krutov V.I. *Osnovaniya i fundamenty na prosadochnykh gruntakh* (Foundations on subsiding loess). Kiev: Budivelnik (Publ.), 1982. 224 p.
3. *SNiP 2.02.01-83. Osnovaania zdanii i sooruzhenii* (Foundations of buildings and constructions). 166 p.
4. Viktorov A.S. *Matematicheskaya morfologiya landshafta* (Mathematical morphology of landscape). Moscow: TRATEK (Publ.), 1998. 180 p.
5. *Natsional'nyi atlas Rossii* (National Atlas of Russia). Moscow: Roskartografiia (Publ.), Vol. 2. *Priroda. Ekologiya* (Nature. Ecology). 495 p.
6. Makarova N.V., Makeev V.M., Sukhanova T.V., Dorozhko A.G., Korobova I.G., and Karfidova Ye.A. The neotectonics and geodynamics of the south-west Voronezh antecline slope. *Vest. Mos. Univ. Ser. 4: Geol.* 2015. No. 1. P. 10–19. (in Russ.)
7. Velichko A.A. *Geologicheskii vozrast verkhnego paleoloita tzentral'nykh raionov Russkoi ravniny* (Geological age of the Upper Paleolithic in the Russian plain central regions). Moscow: AN SSSR (Publ.), 1961. 294 p.
8. Gorokhova Ye.A. and Mikhno V.B. The modern structure and the transformation of the landscapes in the Kursk region. *Vest. Voron. Univ. Ser. Geog. Geoekol.* 2011. No. 2. P. 17–25. (in Russ.)
9. Glazovskaia M.A. Denudational-aggradational patterns of soil cover as the manifestations. *Pochvoved.* 2000. No. 2. P. 134–137. (in Russ.)
10. Viktorov A.S. *Osnovnyie problemy matematicheskoi morfologii landshafta* (The key problems of mathematical morphology of landscapes). Moscow: Nauka (Publ.), 2006. 252 p.
11. Trofimov V.T. *Genezis prosadochnosti liossovykh porod* (Genesis of the loess soil subsidence). Moscow: MGU (Publ.), 1999. 271 p.
12. Krutov V.I., Kovaliov A.S., and Kovaliov V.A. *Proektirovanie i ustroistvo osnovanii i fundamentov na prosadochnykh gruntakh* (Design and construction of foundations on subsidence soils). Moscow: Izd-vo Ass. Stroit. Vuz. (Publ.), 2015. 544 p.
13. Vasilevskaia L.A. Zoning with respect to the conditions of forming the Kursk region ground waters. *Izv. Yugo-Zap. Gos. Univ. Ser. Tekh.i Tekhnol.* 2012. No. 2–2. P. 251–254. (in Russ.)
14. Averianov S.V. *Filtratzia iz kanalov o ieio vlianie na rezhim gruntovykh vod* (Filtration from channels and its influence on the ground water regime). Moscow: Kolos (Publ.), 1982. 237 p.
15. Koroliuk V.S., Portenko N.I., Skorokhod A.V., and Turbin A.F. *Spravochnik po teorii veroiatnostei i matematicheskoi statistike* (Reference book on the probability theory and mathematical statistics). Moscow: Nauka (Publ.), 1985. 640 p.
16. *Metodicheskoe rukovodstvo po inzhenerno-geologicheskoi siomke masshtaba 1:200 000 (1:100 000 – 1:500 000)* (Handbook on engineering geology investigations in scale 1:200 000 (1:100 000 – 1:500 000)). Moscow: Nedra (Publ.), 1978. 391 p.
17. Puzachenko Yu.G. *Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geographicheskikh issledovaniakh: Uchebn. Posob. Dlia stud. VUZov* (Mathematical methods in ecological and geographical researches: Tutorial for university students). Moscow: Izd. Tsentr “Akademia” (Publ.), 2004. 416 p.
18. Kramer G. *Matematicheskie metody statistiki* (Mathematical methods of statistics) Moscow: Mir (Publ.), 1975. 648 p.
19. *GOST 12071-2000. Grunty. Otbor, upakovka, transportirovanie i khranenie obraztsov* (Soils. Sampling, packing, transportation and keeping of the samples). 18 p.
20. *GOST 23161-2012 Grunty. Metod laboratornogo opredelenia kzarakteristik prosadochnosti* (Soils. Method of laboratory determination of subsiding characteristics). 15 p.