

УДК 631.4: 911.2

Е.А. Левченко¹, Н.И. Лозбенев², Д.Н. Козлов³

ДИАГНОСТИКА ВНУТРИЛАНДШАФТНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ГИДРОМОРФИЗМА ПОЧВ ЛЕСОСТЕПИ ВОРОНО-ЦНИНСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ ПРИВОЛЖСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

Рассматриваются методы ландшафтной индикации водного режима почв лесостепной зоны. Мощный гумусовый горизонт, карбонаты средней и нижней части профиля затрудняют морфологическую диагностику поверхностного и грунтового переувлажнения черноземных почв, что требует использования аналитических показателей. В условиях застойно-промывного водного режима глееобразование вызывает активный вынос большинства металлов. Как следствие – уменьшается доля гумусовых кислот фракции II, связанных с кальцием, относительно гумусовых кислот, извлекаемых щелочью без декальцирования (фракции I). Соотношение оптических плотностей вытяжек гумусовых кислот фракций I и II из мелкозема пахотного горизонта использовано Л.В. Степановой при расчете коэффициента степени гидроморфизма (K_{I-II}) почв севера Тамбовской равнины.

Диагностические возможности K_{I-II} исследованы в условиях Вороно-Цнинского междуречья Приволжской возвышенности как по отношению к почвам возрастающей степени переувлажнения, так и относительно топографических факторов дифференциации поверхностного стока. Экспериментальные значения K_{I-II} статистически достоверно увеличиваются в ряду почв с морфологическими признаками возрастающего переувлажнения как атмосферного (луговато-черноземные – серые лесные поверхностно-глееватые), так и смешанного (лугово-черноземные – луговые – влажнолуговые) питания. В условиях однородности почвообразующих пород внутриландшафтная дифференциация поверхностного стока может быть описана моделью множественной регрессии от четырех морфометрических характеристик рельефа: глубины замкнутых понижений, топографического индекса влажности, топографического фактора эрозионной активности стока и абсолютной высоты. Модель позволила объяснить 87% пространственного варьирования K_{I-II} и построить прогнозную карту этого показателя для трех ключевых участков Вороно-Цнинского междуречья, контрастных по условиям увлажнения. На основе прогнозной карты K_{I-II} выявлены ареалы почв возрастающей продолжительности переувлажнения пахотного горизонта. Почвы с самым продолжительным сезонным переувлажнением до двух и более месяцев, занимая не более 2% площади, определяют высокую контрастность почвенного покрова недренируемых и замедленно дренируемых междуречий лесостепи.

Ключевые слова: черноземы, почвенно-ландшафтные связи, коэффициент степени гидроморфизма, водный режим почв, структурно-функциональная организация почвенного покрова

Введение. Климатические условия лесостепи с благоприятным водно-воздушным и термическим режимами гумификации растительных остатков способствуют формированию самых плодородных почв среди всех природных зон суши. Однако разнообразие эдафических условий определяет широкое варьирование режимов увлажнения и аэрации почв и, как следствие, – значительное различие параметров биологического круговорота и почвообразования как природных геосистем, так и агроценозов лесостепной зоны.

Вместе с тем, изучение внутриландшафтного перераспределения влаги как важнейшего механизма дифференциации эдафических и агроэкологических условий лесостепной зоны, сопряжено с рядом проблем. Главная из них – ограниченные возможности организации долговременных инструментальных наблюдений за сезонной и многолетней измен-

чивостью водного режима элементарных геосистем, а также процессами миграции влаги в зависимости от совокупности топографических и литологических факторов [Водный баланс ..., 1974; Базыкина, 2010]. Несмотря на общий прогресс в развитии прямых методов мониторинга водного режима [Beff et al., 2013] и средств имитационного моделирования поверхностного и внутрипочвенного стока [Golden et al., 2014], комплексные ландшафтно-гидрологические исследования на лесостепных стационарах в настоящее время не ведутся.

Альтернативный подход связан с использованием косвенных методов ландшафтной индикации почв возрастающего увлажнения с непромывным, промывным, застойно-промывным, десуктивно-выпотным типами водных режимов. В условиях сплошной распашки лесостепных междуречий возможности фитоиндикации сильно ограничены, что

¹ Почвенный институт им. В.В. Докучаева, отдел агроэкологической оценки почв и проектирования агроландшафтов, мл. науч. с.; e-mail: novichkova.ea@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, магистрант. Почвенный институт им. В.В. Докучаева, отдел агроэкологической оценки почв и проектирования агроландшафтов, инженер; e-mail: nlozbennev@mail.ru

³ Почвенный институт им. В.В. Докучаева, зам. дир., канд. геогр. н.; e-mail: daniilkozlov@gmail.com

определяет ведущую роль почвы при изучении закономерностей внутриландшафтного перераспределения влаги [Воробьева, 2013]. Однако морфологическая диагностика водного режима почв черноземного ряда сопряжена со сложностью фиксации признаков переувлажнения на фоне мощного гумусового горизонта и карбонатов срединного горизонта [Зайдельман с соавт., 2013; Левченко с соавт., 2017; Thompson, Bell, 2001].

Проблема полевой диагностики переувлажненных почв черноземного ряда и особенностей их водного режима определяет необходимость подкрепления морфологической диагностики почв лесостепной зоны аналитическими данными. Для этих целей предлагались различные показатели, основанные на соотношении аморфных и валовых соединений железа [Schwertmann, 1988; Водяницкий, 2007], содержании железа и марганца в составе ортштейнов [Зайдельман, Оглезнев, 1971], фракционном составе гумуса [Зайдельман, 1992]. Исходно эти показатели разработаны для почв таежно-лесной зоны и каждый из них обладает теми или иными ограничениями, что сужает возможности их использования при диагностике водного режима и степени переувлажнения почв лесостепной зоны [Зайдельман, 2004; Степанцова, 2012; Зайдельман с соавт., 2012].

В поиске информативного показателя количественной диагностики переувлажненных почв черноземной зоны Л.В. Степанцовой был предложен коэффициент степени гидроморфизма (K_{I-II}), основанный на соотношении оптических плотностей вытяжек гумусовых кислот фракций I и II из пахотного горизонта [Степанцова, Красин, 2011; Зайдельман с соавт., 2012]. Периодическое поверхностное заболачивание способствует выносу кальция из почвенно-поглощающего комплекса и увеличению доли фракции I, извлекаемой щелочью без декальцирования. В почвах с застойно-промывным водным режимом значения K_{I-II} увеличиваются пропорционально продолжительности избыточного увлажнения.

Принципиальная возможность использования K_{I-II} показана при диагностике продолжительности весеннего переувлажнения и степени гидроморфизма черноземовидных почв севера Тамбовской равнины [Зайдельман с соавт., 2012], для диагностики почв грунтового увлажнения и глубины залегания минерализованных грунтовых вод [Степанцова, Красин, 2011], для оценки эколого-гидрологического режима почв лесостепи и степени деградации органического вещества [Степанцова с соавт., 2015]. Данный показатель может использоваться для пахотных почв, поскольку агротехнические приемы обработки почвы и внесение минеральных и органо-минеральных удобрений практически не влияют на оптическую плотность гумусовых кислот [Зайдельман с соавт., 2013].

Потенциальная информативность K_{I-II} при оценке длительности периода с влажностью пахотного горизонта больше предельной полевой влагоемкости [Романова, 2015], а также относительная про-

стога его аналитического определения, послужили основанием для использования K_{I-II} в качестве диагностического показателя водного режима при картографировании почвенного покрова лесостепи Вороно-Цнинского междуречья Приволжской возвышенности Тамбовской области. Продолжительность сезонного переувлажнения пахотного горизонта рассматривается нами одновременно и как результат перераспределения стока по элементам мезо- и микрорельефа и как фактор вертикальной дифференциации почвенного профиля совокупностью элементарных почвенных процессов, связанных с особенностями водного режима. Подобная двойственная интерпретация пространственной изменчивости значений K_{I-II} позволила в картографической форме выразить закономерности водно-миграционной дифференциации эдафических и агроэкологических условий лесостепной зоны.

Последовательно решались задачи: 1) установить характерные значения K_{I-II} почв возрастающего ряда поверхностного и поверхностно-грунтового увлажнения, 2) определить роль топографического фактора перераспределения поверхностного стока в изменчивости значений K_{I-II} , 3) построить прогнозную карту K_{I-II} в зависимости от топографических особенностей, 4) выявить ареалы почв возрастающей продолжительности переувлажнения.

Материал и методы исследований. Слабопересеченный рельеф Вороно-Цнинского междуречья (рис. 1) и породы с низкой фильтрационной способностью определили условия затрудненного поверхностного и внутрипочвенного стока и, как следствие, распространение полугидроморфных и гидроморфных почв черноземного ряда [Левченко с соавт., 2017]. В условиях пространственной однородности тяжелосуглинистых и глинистых пород разнообразие почв обусловлено спецификой водного режима, зависящего от соотношения поверхностного и почвенно-грунтового увлажнения различных элементов мезо- и микрорельефа. Сопряженность почв с особенностями рельефа исследована на трех ключевых участках общей площадью 390 га, контрастных по условиям увлажнения.

Первый ключевой участок (рис. 1, А, рис. 2, А) расположен в пределах недренированного междуречья (общий уклон до 2°), осложненного многочисленными западинами и слаборазвитой сетью ложбин. Крайне замедленное поверхностное и внутрипочвенное перераспределение атмосферных осадков определяет формирование постоянной верховодки. Пресные почвенно-грунтовые воды гидрокарбонатно-кальциевого состава залегают на глубине от 1,5 до 3 м. В замкнутых понижениях поверхностный застой влаги может наблюдаться до двух и более месяцев. В составе почвенного покрова недренированного междуречья преобладают лугово-черноземные почвы. На их фоне по западинам и ложбинам располагаются пятна луговых выщелоченных и влажнолуговых осолоделых почв разной степени оглеения. Единично по днищам ложбин встречаются луговые омергелеванные почвы.

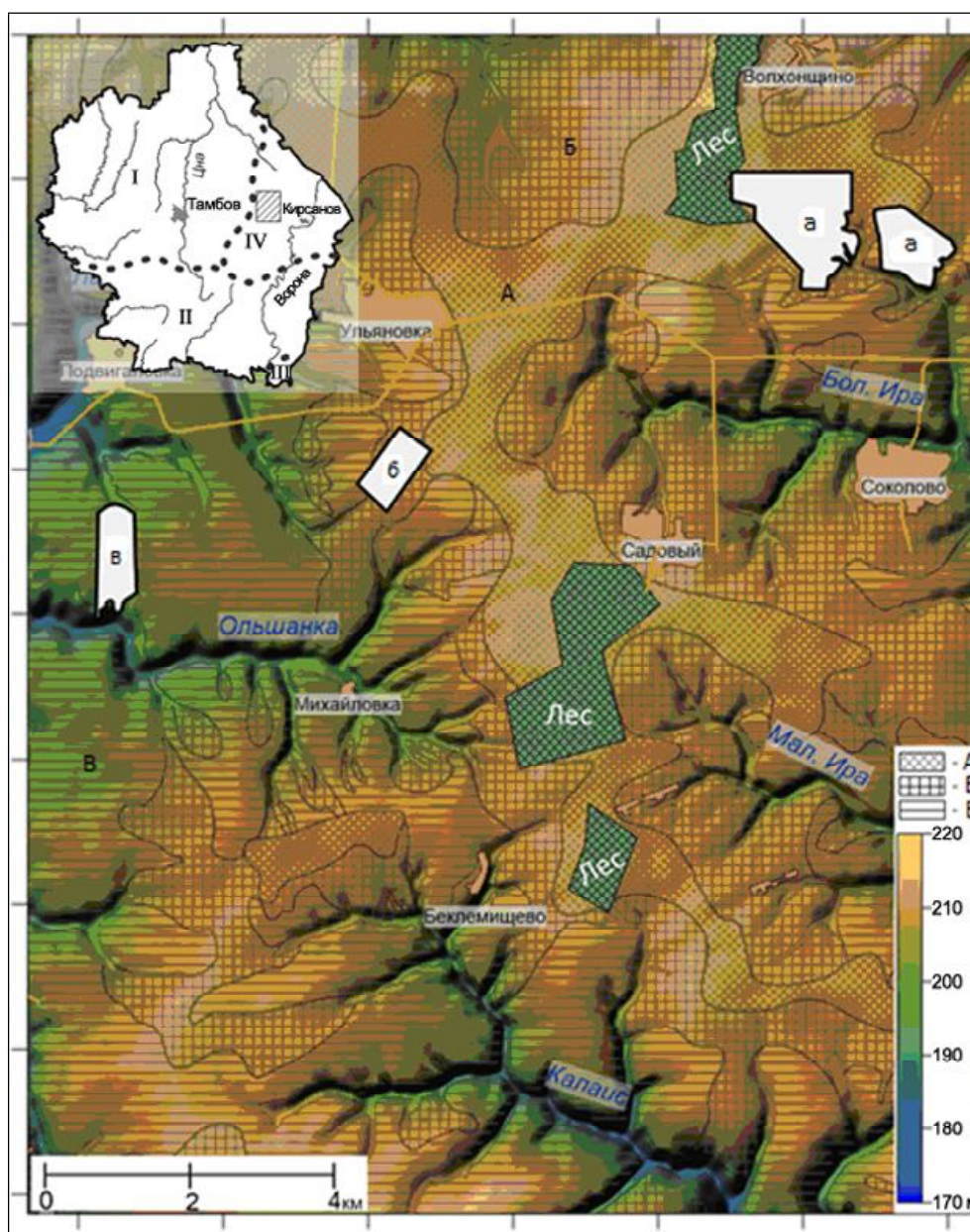


Рис. 1. Положение района исследования в системе физико-географического районирования Тамбовской области (I – северная лесостепь, II – типичная лесостепь, III – южная лесостепь Окско-Донской низменности, IV – северная лесостепь Приволжской возвышенности) и ключевых участков детальной почвенно-топографической съемки в структуре Вороно-Цнинского междуречья: А – недrenируемого (ключ а), Б – замедленно дренируемого (ключ б), В – дренируемого (ключ в)

Fig. 1. Location of the study area within the system of geographic zoning of Tambov Oblast (I – northern forest steppe, II – typical forest steppe of Oka-Don Lowland; IV – northern forest steppe of Volga Upland) and the key plots of the detail soil and topographic survey within the structure of Vorona and Tsna interfluvium: A – non-drained interfluvium (key plot a), B – slowly drained interfluvium (key plot б), B – drained interfluvium (key plot в)

Второй ключевой участок приурочен к слабо-наклонным равнинам, замедленно дренируемым верховьями эрозионной сети (рис. 1, Б, рис. 2, Б). Верховодка имеет сезонный характер, грунтовые воды залегают глубже 4 м. В водосборных понижениях и ложбинах весеннее переувлажнение сохраняется до одного месяца. На фоне луговато-черноземных обычных почв в условиях выраженного застойно-промывного водного режима возрастающей интенсивности формируются луговато-черноземные выщелоченные, луговато-черноземные

оподзоленные и серые лесные поверхностно-глееватые почвы.

Третий ключевой участок заложен в пределах слабо-наклонных и пологих равнин, расчлененных густой сетью ложбин, балок и долин малых рек, уровень грунтовых вод глубже 6 м (рис. 1, В, рис. 2, В). Тем не менее, вследствие замедленного внутрипочвенного стока, здесь повсеместно распространены луговато-черноземные почвы с признаками сезонного переувлажнения срединного горизонта. В отдельных водосборных понижениях при дополнитель-

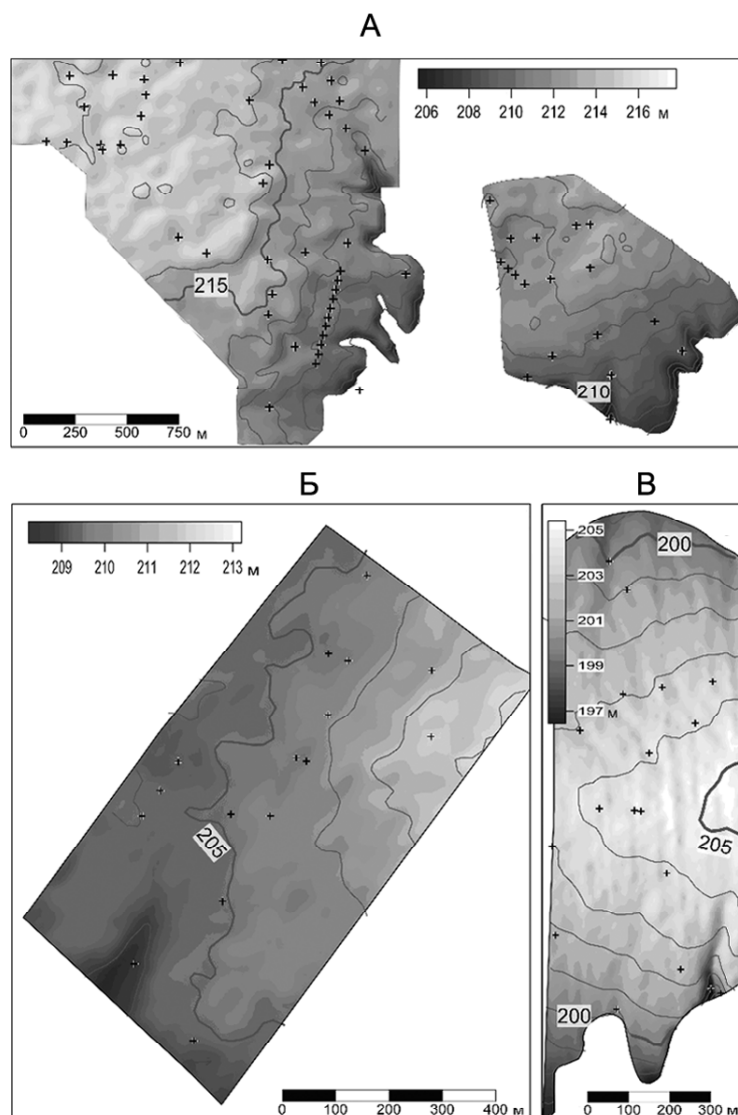


Рис. 2. Положение точек почвенного обследования относительно рельефа ключевых участков Вороно-Цнинского междуречья: А – недренируемого, Б – замедленно дренируемого, В – дренируемого. Значком + показаны точки почвенного обследования

Fig. 2. Location of soil survey points in relation to topography of the key plots within the Vorona and Tsna rivers interfluve: А – non-drained, Б – slowly drained, В – drained. Symbol+indicates soil survey points

ном натечном увлажнении формируются луговато-черноземные выщелоченные и оподзоленные почвы. Вдоль коротких прибалочных склонов крутизной до 5° чередуются слабо-, среднесмытые, смыто-намытые и намытые луговато-черноземные почвы.

Разнообразие почв и их сопряженность с условиями мезо- и микрорельефа охарактеризовано в 27 разрезах и 114 скважинах с морфологической и аналитической характеристикой почв (рис. 2). Опробование проводилось в 2014–2015 гг. при атмосферном увлажнении ниже среднегололетней нормы. Топографические особенности ключевых участков установлены с помощью детальной геодезической съемки средствами дифференцированной системы спутникового позиционирования GNSS STONEX S9III+ с точностью 1 см для плановых и высотных

координат. В программе SAGA построены цифровые модели рельефа с размером ячейки 20×20 м и рассчитано порядка 20 морфометрических величин [Shary et al., 2002; Florinsky, 2016], описывающих разнообразие форм рельефа как фактора дифференциации водных потоков.

Определение K_{I-II} для 106 образцов из пахотного горизонта выполнено по методике Л.В. Степановой [2012]. Систематические различия экспериментальных значений K_{I-II} между таксонами почв на уровне рода (табл. 1) оценены с помощью непараметрического теста с поправкой на множественные сравнения [Gao et al., 2008]. Пороговые значения K_{I-II} для групп почв возрастающей степени увлажнения определены на основе сравнения их плотностей распределения K_{I-II} (рис. 3, Б). Лугово-черноземные омергелованные почвы не включены в анализ из-за недостаточного количества точек их опробования.

Сопряженность пространственного варьирования K_{I-II} с топографическими факторами перераспределения поверхностного стока оценена средствами пошагового регрессионного анализа [Пузаченко, 2004]. С его помощью отобраны наиболее значимые морфометрические характеристики земной поверхности и определен их индивидуальный и совокупный вклады в объяснение пространственной изменчивости K_{I-II} (табл. 2, рис. 4). Регрессионная зависимость использована для прогноза значений K_{I-II} в каждой ячейке цифровой модели рельефа ключевых участков. На последнем этапе выполнена группировка ячеек по установленным пороговым значениям K_{I-II} почвенных таксонов (рис. 5). Тем самым получены карты ареалов почв возрастающей продолжительности переувлажнения пахотного горизонта, как результата перераспределения поверхностного стока по элементам рельефа.

Результаты исследований и их обсуждение. По результатам лабораторных анализов значения K_{I-II} увеличиваются в ряду почв возрастающего поверхностного и смешанного увлажнения (рис. 3, А), достигая максимальных значений у серых лесных поверхностно-глееватых почв днищ западин ($K_{I-II}=7,1-10,9$). Минимальные значения K_{I-II} (менее 1) установлены для эродированных почв прибалочных склонов. Наиболее распространены почвы с значениями K_{I-II} от 1 до 3 (лугово-черноземные обычные и выщелоченные почвы, лугово-черноземные обычные и луговые выщелоченные). При уровне значимости 0,05 непараметрический тест суммы рангов (табл. 1) не выявил систематических различий K_{I-II} некоторых пар почв поверхностного и смешанного увлажнения. Почвы с общим диапазоном значений K_{I-II} объединены в

Таблица 1

Непараметрический тест различий K_{I-II} родов почв с поправкой на множественные сравнения

Почвы*	Интервал K_{I-II} **	Число точек в выборке	Почвы						
			Чл1э	Чл1	Чл1в	Чл1о	СЛ	Чл2	Лчв
Чл1э	0,4±0,3	13	—						
Чл1	1,5±0,5	16	0,000	—					
Чл1в	2,2±0,4	13	0,000	0,001	—				
Чл1о	3,4±0,4	9	0,000	0,000	0,000	—			
СЛ	9,0±1,9	5	0,000	0,000	0,000	0,002	—		
Чл2	1,7±0,4	19	0,000	0,281	0,003	0,000	0,000	—	
Лчв	2,3±0,7	17	0,000	0,003	0,916	0,000	0,000	0,006	—
Влос	3,1±1,2	10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,162	0,000	0,000

Примечание. Серым цветом показаны данные с недостоверными различиями при уровне значимости 0,05.

*Почвы поверхностного увлажнения: Чл1э – луговато-черноземная эродированная; Чл1 – луговато-черноземная; Чл1в – луговато-черноземная выщелоченная; Чл1о – луговато-черноземная оподзоленная; СЛ – серая лесная поверхностно-глееватая. Почвы смешанного (поверхностного и почвенно-грунтового) увлажнения: Чл2 – лугово-черноземная; Лчв – луговая выщелоченная; Влос – влажнолуговая осолоделая.

** Среднее арифметическое значений $K_{I-II} \pm$ стандартное отклонение.

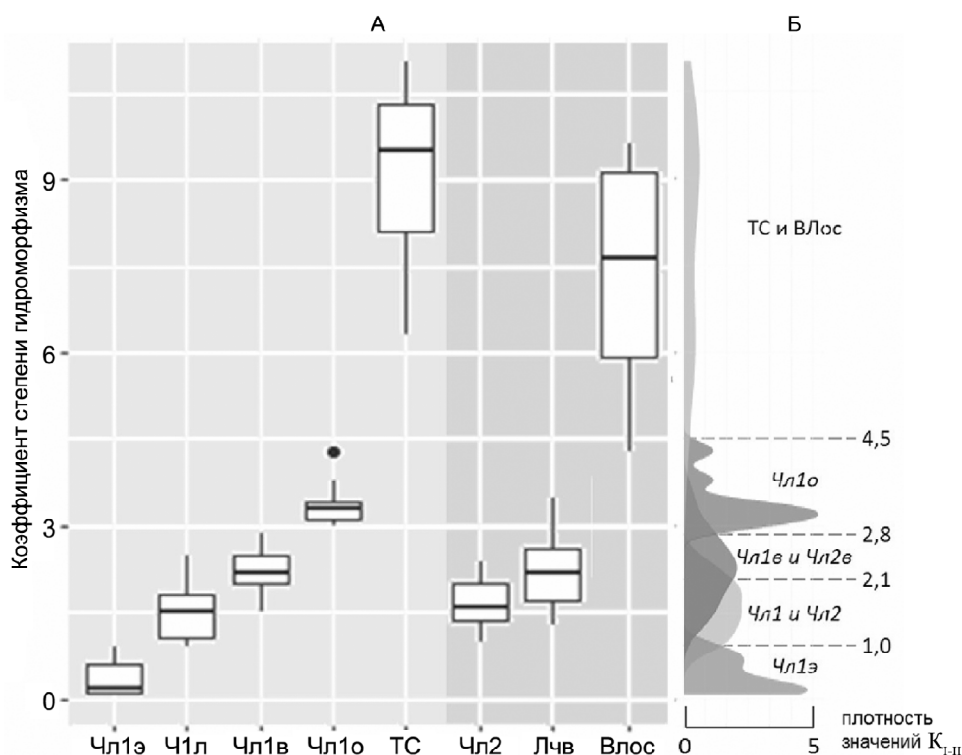


Рис. 3. Сравнение значений K_{I-II} почв Вороно-Цнинского междуречья возрастающего ряда гидроморфизма (табл. 1): А – медиана, нижний и верхний квартили, минимальное и максимальное значение выборки K_{I-II} для родов почв поверхностного увлажнения: луговато-черноземных эродированных (Чл1э); луговато-черноземных обычных (Чл1); луговато-черноземных выщелоченных (Чл1в); луговато-черноземных оподзоленных (Чл1о); СЛ – серых лесных поверхностно-глееватых; поверхностного и почвенно-грунтового увлажнения: лугово-черноземных обычных (Чл2); луговых выщелоченных (Лчв); влажнолуговых осолоделых (Влос); Б – кривые распределения K_{I-II} достоверно различающихся групп почв (СЛ и Влос; Чл1о; Чл1в и Чл2в; Чл1 и Чл2; Чл1э)

Fig. 3 The mean K_{I-II} values for soils of increasing range of hydromorphism on Vorona and Tsna interfluvium (Table 1): А – median, lower and upper quartiles, minimum and maximum value of the K_{I-II} sample for the soil subtypes of different humidification degree: meadow chernozem eroded soil (Чл1э); meadow chernozem soil (Чл1); meadow chernozem leached soil (Чл1в); meadow chernozem podzolized soil (Чл1о); dark gray forest surface gleied soil (СЛ); meadow chernozemic soil (Чл2); meadow leached soil (Лчв); moist meadow solodized soil (Влос); Б – for statistically different soil groups (СЛ and Влос; Чл1о; Чл1в and Чл2в; Чл1 and Чл2; Чл1э)

Таблица 2

Результаты регрессионного анализа зависимости значений K_{I-II} от свойств рельефа

Морфометрическая величина и диапазон ее значений	Коэффициент чувствительности (beta)		Коэффициент регрессии		Уровень значимости
	значение	ст. ошибка	значение	ст. ошибка	
Глубина замкнутых понижений ($CDep$, 0–0,37 м)	0,69	0,05	16,2	1,09	0,00
Топографический индекс влажности (TWI , 4,9–17)	0,3	0,05	0,27	0,04	0,00
Эрозионная энергия потока (LS фактор, 0–1,9)	–0,14	0,05	–1,98	0,59	0,00
Абсолютная высота (H , 196–218 м)	0,11	0,05	0,05	0,02	0,02

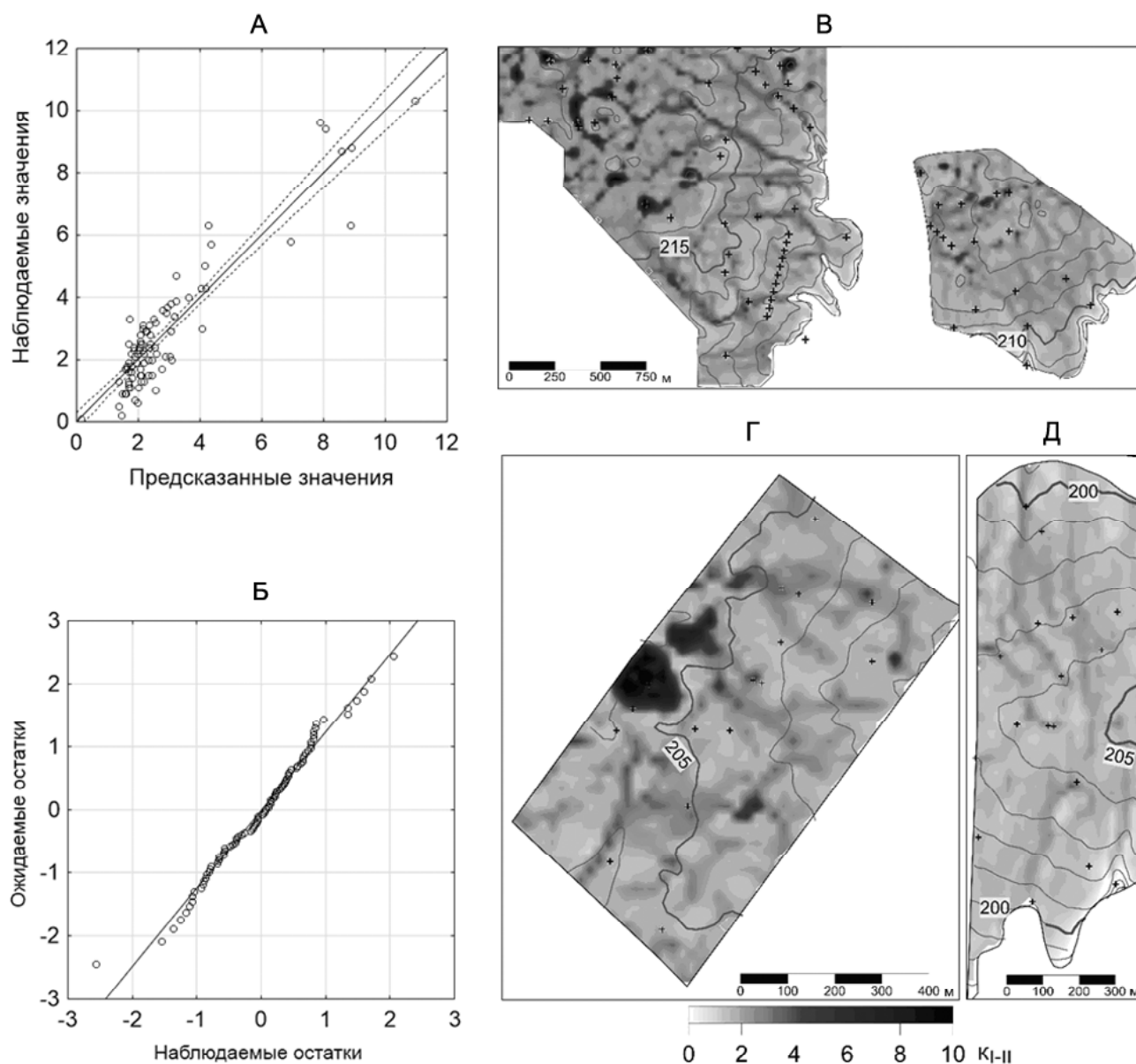


Рис. 4. Регрессионная модель зависимости пространственной изменчивости K_{I-II} от морфометрических величин рельефа (табл. 2): А – соответствие экспериментальных и модельных значений ($R^2=0,87$ ст. ошибка 0,79), Б – сравнение распределения остатков регрессионной модели с нормальным законом; прогнозные карты K_{I-II} для трех ключевых участков Вороно-Цнинского междуречья: В – недrenируемого, Г – замедленно дренируемого, Д – дренируемого

Fig. 4. The regression model of K_{I-II} spatial variability in relation to the morphometric values (Table 2): А – correspondence of the experimental and model values ($R^2=0,87$ st. error 0,79), Б – comparison of residuals distribution of the regression model and the normal distribution; K_{I-II} prognostic maps for three key plots on the Vorona and Tsna rivers interfluvium: В – non-drained, Г – slowly drained, Д – drained

группы (рис. 3, Б): луговато-черноземные обычные и лугово-черноземные обычные почвы ($K_{I-II}=1,0-2,1$), луговато-черноземные выщелоченные и луговые выщелоченные ($K_{I-II}=2,1-2,8$), серые лесные поверхностно-глееватые атмосферного увлажнения и влажнолуговые почвы смешанного увлажнения ($K_{I-II}>4,5$). Перечисленные пары почв формируются в схожих элементах микрорельефа с одинаковыми условиями поверхностного, но с различными условиями почвенно-грунтового увлажнения [Левченко с соавт., 2017]. При этом различия K_{I-II} достоверны между почвами возрастающего поверхностного увлажнения (от микроводоразделов к днищам ложбин и замкнутых понижений), независимо от их типа увлажнения – поверхностного или смешанного (табл. 1).

Ведущее значение рельефа в дифференциации K_{I-II} как показателя продолжительности переувлажнения пахотного горизонта почв, подтверждается высокой степенью сопряженности пространственного варьирования значений K_{I-II} и морфометрических величин (табл. 2, рис. 4, А–Б). Линейный пошаговый регрессионный анализ позволил отобрать четыре морфометрические величины, в совокупности, объясняющие 87% изменчивости показателя K_{I-II} . Регрессионная модель имеет вид:

$$K_{I-II} = -10,4 + 0,05H + 16,2CDep + 0,27TWI - 1,9LS \text{ фактор} \pm 0,79,$$

где H – абсолютная высота (м), $CDep$ – глубина замкнутых понижений (см), TWI – топографический индекс влажности, LS фактор – топографический фактор эрозионной активности поверхностного стока. Коэффициент детерминации модели $R^2 = 87\%$, стандартная ошибка – 0,79. Распределение остатков регрессионной модели подчинено нормальному закону с уровнем значимости 0,05 (рис. 4, Б).

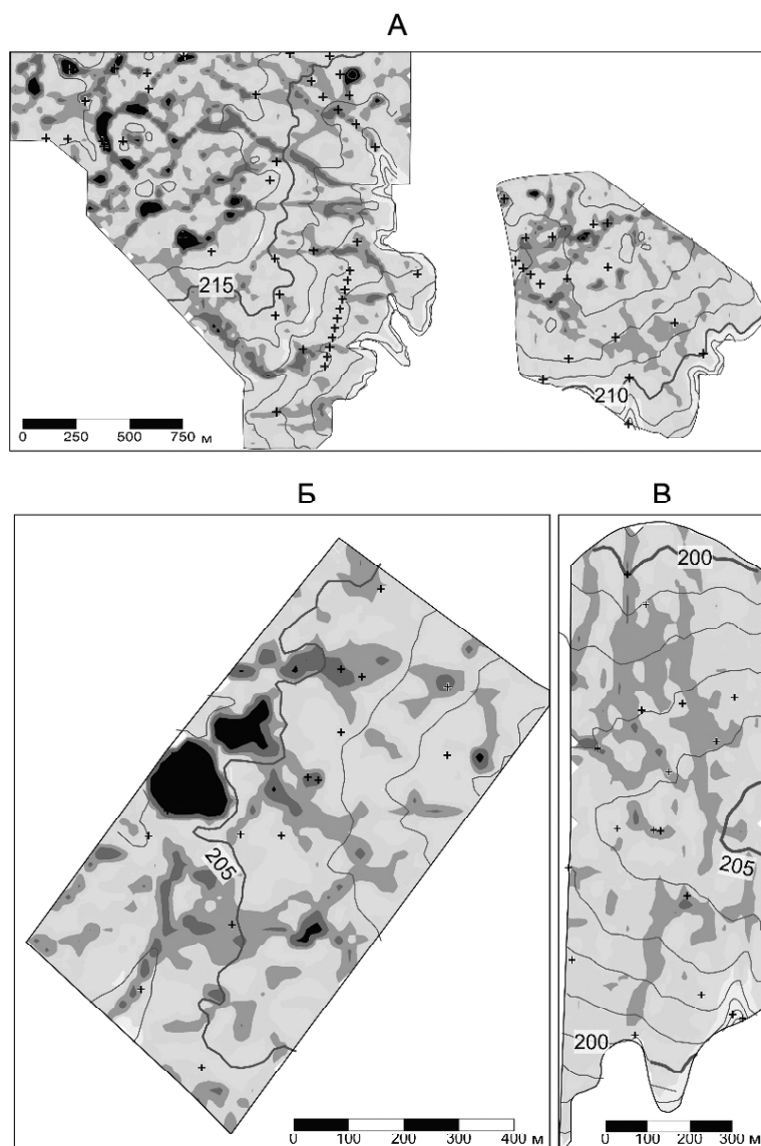
Каждая морфометрическая величина описывает один из механизмов перераспределения влаги. Глубина замкнутых понижений ($CDep$) локализуют днища западин с максимальной продолжительностью переувлажнения и затопления почв в условиях ограниченного стока (K_{I-II} более 4,5). Топографический индекс влажности (TWI , вычисляется как логарифм отношения водосборной площади и крутизны) описывает миграцию влаги между микроводоразделами и ложбинами (K_{I-II} от 1 до 4,5). Высокие значения фактора эрозионной активности (LS фактор, рассчитывается как соотношение крутизны и длины линии тока) в пределах прибалочных склонов объясняют положение смытых почв с самыми низкими значениями K_{I-II} (менее 1). При сочетании эрозии и регулярной вспашки соотношение фракций гумусовых кислот пахотного горизонта смещается в пользу фракции I за счет подпахивания карбонатного горизонта. Абсолютная высота (H) в регрессионном уравнении косвенно характеризует влияние глубины почвенно-грунтовых вод на продолжительность переувлажнения пахотного горизонта. При прочих равных условиях переувлажнение пахотного горизонта длительнее у луговых почв не дренируемых вершинных поверх-

ностей междуречья (H более 213 м) с грунтовыми водами в пределах почвенного профиля. В целом, возрастающий ряд значений K_{I-II} соответствует большей продолжительности поверхностного переувлажнения по мере увеличения водосборной площади в условиях ограниченного стока.

На основе модели рассчитаны значения K_{I-II} почв для каждого элемента цифровой модели рельефа трех ключевых участков (рис. 4, В–Д). Полученные карты демонстрируют значительную неоднородность соотношения оптических плотностей вытяжек гумусовых кислот фракций I и II мелкозема пахотного горизонта. Низкое содержание соединений гумусовых кислот фракции II особенно выражено в пределах не дренируемых (рис. 4, В) и замедленно дренируемых (рис. 4, Г) частей междуречья. Прежде всего это западины, в днищах которых значения K_{I-II} пахотного горизонта больше 4,5, а также днища ($K_{I-II}=3,0-4,0$) и нижние части склонов ($K_{I-II}=2,0-3,0$) ложбинообразных понижений. Минимальные различия K_{I-II} характерны для дренируемых участков междуречья (рис. 4, Д). K_{I-II} изменяется от 0,5 на прибалочных склонах, до 2 в днищах ложбин. У всех ключевых участков значения показателя в почвах автономных позиций микрорельефа не превышают двух.

Диапазон прогнозных значений K_{I-II} разбит на градации, соответствующие группам почв различной продолжительности поверхностного переувлажнения (табл. 1, рис. 3, Б). Для каждой градации оценочно указана длительность периода с влажностью пахотного горизонта больше предельной полевой влагоемкости с учетом данных, полученных ранее для черноземовидных почв севера Тамбовской низменности [Зайдельман с соавт., 2013, стр. 180]. Согласно карте (рис. 5), максимальный ареал (62%) имеют луговато- и лугово-черноземные обычные почвы ($K_{I-II}=1,0-2,1$) с продолжительностью переувлажнения пахотного горизонта до двух недель. Второй по площади ареал (28%) – луговато-черноземных выщелоченных и луговых выщелоченных почв ($K_{I-II}=2,1-2,8$) с продолжительностью переувлажнения от двух недель до одного месяца. Оставшиеся три ареала почв в сумме занимают 10% площади ключевых участков. В порядке убывания площади: луговато-черноземные оподзоленные ($K_{I-II}=2,8-4,5$) с продолжительностью переувлажнения от 1 до 2 месяцев (5%); луговато-черноземные эродированные ($K_{I-II}<1,0$) без переувлажнения пахотного горизонта (4%) и влажнолуговые и серые лесные поверхностно-глееватые ($K_{I-II}>4,5$) с переувлажнением до 2 и более месяцев (1%).

Несмотря на невысокую суммарную площадь, именно участие почв последней категории в составе округло-пятнистых и пятнисто-кольцевых почвенных комбинаций (рис. 5, А) определяет контрастность почвенного покрова лесостепной зоны [Ахтырцев с соавт., 1981; Ахтырцев, 2003]. Для параллельно-струйчатых пятнистостей дренируемых частей междуречья (рис. 5, В) локальные различия в переувлажнении не превышают двух недель. В то



же время для недренированного (рис. 5, А) и замедленно дренируемого (рис. 5, Б) междуречья они составляют полтора и более месяцев, а почвы в составе их почвенных комбинаций различаются на уровне типа.

Дальнейшая почвенно-генетическая интерпретация прогнозной карты K_{I-II} (рис. 5) должна дополнительно учитывать положение почвенно-грунтовых вод относительно почвенного профиля. Ареал почв одной и той же градации K_{I-II} в пределах междуречных недренированных равнин будет соответствовать гидроморфным почвам смешанного увлажнения, а в пределах замедленно дренируемых и дренируемых равнин – полугидроморфным почвам поверхностного увлажнения.

Стоит подчеркнуть региональную специфичность аналитической диагностики водного режима черноземных почв Вороно-Цнинского междуречья Приволжской возвышенности. В исследованиях на Окско-Донской низменности [Зайдельман с соавт., 2013, с. 244] показано, что минерализованные гидрокарбонатно-кальциевые грунтовые воды в пределах почвенного профиля исключают выщелачивание кальция из состава почвенного поглощающего комплекса пахотного горизонта. В этом случае K_{I-II} принимает значения исключительно меньше единицы для почв любых позиций микрорельефа. Для обследованных участков Вороно-Цнинского междуречья K_{I-II} отражает характер исключительно поверхностного увлажнения почв, независимо от особен-

Продолжительность переувлажнения*	Почвы**	K_{I-II}	Площадь, га	Доля, %
нет	Чл1э	<1,0	10,6	2,8
1–2 недели во влажные годы	Чл1 Чл2	1,0–2,1	241,1	62,7
от 2 недель до 1 месяца	Чл1вЛчв	2,1–2,8	108,8	28,3
от 1 до 2 месяцев	Чл1о	2,8–4,5	19,9	5,2
более 2 месяцев	СЛ Влос	>4,5	3,9	1,0

+ – Точки почвенного опробования.

* По Зайдельману с соавт. [2013].

**Обозначение индексов почв см. рис. 3.

Duration of overmoistening*	Soils**	K_{I-II}	Total area, ha	Fraction, %
no	Чл1э	<1,0	10,6	2,8
1–2 weeks in moist years	Чл1 Чл2	1,0–2,1	241,1	62,7
2 weeks to 1 month	Чл1вЛчв	2,1–2,8	108,8	28,3
1 to 2 months	Чл1о	2,8–4,5	19,9	5,2
over 2 months	СЛ Влос	>4,5	3,9	1,0

+ – soil sampling points.

* According to Zaidelmann et al. [2013].

** for soil indices see Fig. 3.

Рис. 5. Прогностические карты ареалов почв возрастающей продолжительности переувлажнения пахотного горизонта трех ключевых участков Вороно-Цнинского междуречья: А – недренируемого, Б – замедленно дренируемого, В – дренируемого

Fig. 5. Prognostic maps of the duration of overmoistening in the arable layer for three key plots on the Vorona and Tsna rivers interfluvium: А – non-drained, Б – slowly drained, В – drained

ностей почвенно-грунтового увлажнения. Вероятно, это обусловлено пресным составом почвенно-грунтовых вод, в условиях междуречного положения формирующихся из атмосферных осадков и не препятствующих выщелачиванию [Ахтырцев, Адерихин, 1981]. Исключение должны составлять луговые омергелеванные почвы ложбин, однако их небольшая площадь не позволила охарактеризовать значения K_{I-II} с достаточной повторностью.

К другой особенности аналитической диагностики водного режима черноземных почв относится невозможность индикации сезонного переувлажнения исключительно нижней части их почвенного профиля по показателям пахотного или гумусового горизонтов. Так луговато- и лугово-черноземные обычные почвы Вороно-Цнинского междуречья и черноземы выщелоченные севера Тамбовской равнины [Зайдельман с соавт., 2013] имеют общий диапазон значений K_{I-II} (от 1 до 2).

Дальнейшие исследования связаны с обоснованием применимости K_{I-II} в качестве индикатора внутриландшафтной дифференциации гидроморфизма почв лесостепи как в зональном ряду почв: серых лесных и черноземных, так и в ряду азональных факторов – литологической неоднородности почвообразующих пород, химизма и минерализации грунтовых вод. Кроме того, сопоставление значений K_{I-II} с продолжительностью переувлажнения пахотного горизонта требует уточнения на основе модельных экспериментов [Зайдельман с соавт., 2013] и стационарных наблюдений за водным режимом почв.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 17-04-02217. Авторы статьи благодарят Л.В. Степанцову за помощь в освоении методики аналитической диагностики K_{I-II} , Н.Б. Хитрова и М.А. Смирнову за обсуждение результатов, а также администрацию ФГУП «Тамбовское» ФСИН России за заинтересованность в проведении научного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ахтырцев А.Б. Гидроморфные почвы и переувлажненные земли лесостепи Русской равнины. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 2003. 224 с.

Ахтырцев А.Б., Адерихин П.Г., Ахтырцев Б.П. Лугово-черноземные почвы центральных областей Русской равнины. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1981. 174 с.

Базыкина Г.С. Анализ многолетней динамики элементов водного баланса типичных черноземов заповедной степи (Курская область) // Почвоведение. 2010. № 12. С. 1468–1478.

Водный баланс основных экосистем Центральной лесостепи. М.: Изд-во ИГ АН СССР, 1974. Ч. 1. 282 с.

Водяницкий Ю. Н. Новый показатель гидроморфизма почв по состоянию железа // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2007. № 4. С. 33–35.

Воробьева И.Б. Особенности гидротермических условий и органическое вещество почв островной лесостепи (Назаровская котловина) // Аридные экосистемы. 2013. Т. 19. № 2(55). С. 32–42.

Зайдельман Ф.Р. Деградация богарных и орошаемых черноземов под влиянием переувлажнения и их мелиорация. М.: АПР, 2012. 212 с.

Выводы:

– для лесостепи Вороно-Цнинского междуречья Приволжской возвышенности подтверждена высокая информативность K_{I-II} при аналитической диагностике почв с застойно-промывным типом водного режима. Экспериментальные значения K_{I-II} увеличиваются в ряду почв с морфологическими признаками возрастающего поверхностного переувлажнения как атмосферного, так и смешанного питания. Данный показатель может использоваться в качестве меры длительности периода с влажностью пахотного горизонта выше значений его предельной полевой влагоемкости;

– в условиях однородности почвообразующих пород внутриландшафтная дифференциация гидроморфизма почв региона определяется главным образом размерами и формой их водосборной и дисперсивной областей и может быть описана моделью множественной регрессии от четырех морфометрических характеристик рельефа: глубины замкнутых понижений, топографического индекса влажности, топографического фактора эрозионной активности стока и абсолютной высоты. Модель позволяет объяснить 87% пространственного варьирования K_{I-II} .

– прогнозная карта K_{I-II} позволяет выявлять ареалы почв возрастающей продолжительности переувлажнения пахотного горизонта в зависимости от рельефа. Почвы с самым продолжительным сезонным переувлажнением до двух и более месяцев, занимая не более 2% площади, определяют высокую контрастность недренированных и замедленно дренированных междуречий Вороны и Цны.

Зайдельман Ф.Р. Естественное и антропогенное переувлажнение почв. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. 288 с.

Зайдельман Ф.Р. Морфоглеогенез, его визуальная и аналитическая диагностика // Почвоведение. 2004. № 4. С. 389–398.

Зайдельман Ф.Р., Оглезнев А.К. Количественное определение степени заболоченности почв по свойствам конкреций // Почвоведение. 1971. № 10. С. 94–101.

Зайдельман Ф.Р., Степанцова Л.В., Никифорова А.С., Красин В.Н., Сафронов С.Б., Красина Т.В. Генезис и деградация черноземов Европейской России под влиянием переувлажнения. Способы защиты и мелиорации. Воронеж: Кварта, 2013. 352 с.

Левченко Е.А., Козлов Д.Н., Смирнова М.А., Авдеева Т.Н. Диагностические свойства и классификация почв лесостепи Вороно-Цнинского междуречья Приволжской возвышенности // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 88. С. 3–26. DOI 10.19047/0136-1694-2017-88-3-26

Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Academia, 2004. 416 с.

Романова Т.А. Водный режим почв Беларуси. Минск: Белорусская наука, 2015. 144 с.

Степанцова Л.В. Агрофизические свойства, гидрологический режим и диагностика черноземовидных почв севера Тамбовской низменности. Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2012. 47 с.

Степанцова Л.В., Красин В.Н. Количественный показатель глубины залегания грунтовых вод в черноземовидных почвах севера Тамбовской равнины // Вестн. МичГАУ. 2011. Ч. 1. № 2. С. 106–110.

Степанцова Л.В., Красин В.Н., Красина Т.В. Влияние гидроморфизма на фракционный состав органического вещества черноземных почв Тамбовской равнины // Отражение био-, гео-, антропоферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове: сборник материалов V межд. научной конференции, посвященной 85-летию кафедры почвоведения и экологии почв. Томск: ТГУ, 2015. С. 117–120.

Beff L., Gunther T., Vandoorne B., Couvreur V., Javaux M. Three-dimensional monitoring of soil water content in a maize field using Electrical Resistivity Tomography // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2013. V. 17. Iss. 2. P. 595–609. DOI 10.5194/hess-17-595-2013

Florinsky I.V. Digital terrain analysis in soil science and geology. Amsterdam: Elsevier – Academic Press, 2016. 486 p.

Gao X., Alvo M., Chen J., Li G. Nonparametric Multiple Comparison Procedures for Unbalanced One-Way Factorial Designs // J. Statistical Planning and Inference. 2008. № 138. P. 2574–2591.

Golden H.E., Lane C.R., Amatya D.M., Bandilla K.W., Hadas R.K., Knight C.D., Ssegane H. Hydrologic connectivity between geographically isolated wetlands and surface water systems: A review of select modeling methods // Environmental Modelling & Software. 2014. V. 53. P. 190–206.

Schwertmann U. Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments // Iron in Soils and Clay Minerals. NATO ASI Series. 1988. V. 217. P. 267–308.

Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. 2002. V. 107. № 1–2. P. 1–32.

Thompson A., Bell J.C. Hydric soil indicators in Mollisol landscapes // Wetland Soils: Genesis, Hydrology, Landscapes, and Classification, CRC Press. 2001. Ch. 17. P. 371–383.

Поступила в редакцию 13.07.2018

После доработки 19.10.2018

Принята к публикации 21.02.2019

E.A. Levchenko¹, N.I. Lozbenov², D.N. Kozlov³

DIAGNOSTICS OF THE INTRA-LANDSCAPE DIFFERENTIATION OF HYDROMORPHISM OF FOREST STEPPE SOILS WITHIN THE VORONA AND TSNA RIVERS INTERFLUVE OF THE VOLGA UPLAND

The paper evaluates the methods of landscape water regime indication within the forest steppe zone. Thick humus layer and carbonates in the middle and lower parts of the profile hinder the morphologic diagnostics of surface and ground overmoistening of chernozemic soils, thus requiring the application of analytical criteria. Under stagnant-percolative water regime the forming of gley causes the active outflow of most metals. Consequently, the share of IInd humus acids fraction which is associated with calcium decreases in relation to that of Ist humus acids fraction extracted by alkali without decalcification. To calculate the hydromorphism degree coefficient for soils of the northern part of the Tambov plain L.V. Stepancova used the optical densities correlation of Ist and IInd humic acids extracted from fine grained material of the arable layer (K_{I-II}).

The diagnostic potential of K_{I-II} was studied for the Vorona and Tsna rivers interfluvium of the Volga Upland in relation to both the increasing degree of soil hydromorphism and the topographic factors differentiating the surface runoff. The experimental values of K_{I-II} show a statistically significant increase along the range of soils with increasing moistening resulting from both atmospheric and mixed water input. Under homogenous soil forming rocks the intra-landscape differentiation of surface runoff is described by a multiple regression model using four morphometric characteristics: the depth of closed depressions, topographic wetness index, topographic factor of runoff erosion activity and the absolute height. The model explains 87% of K_{I-II} spatial variability and was used to compile the prognostic map of index values for three key plots on the Vorona and Tsna rivers interfluvium, which are characterized by contrasting moistening conditions. Basing on the K_{I-II} prognostic map the areas of soils with increasing duration of arable layer overmoistening were identified. The soils with the longest seasonal overmoistening, i.e. 2 months and more, cover no more than 2% of the total area. However, they contribute to high contrasts of soil cover within non-drained and slowly drained interfluviums in the forest steppe zone.

Key words: chernozems, soil and landscape correlations, hydromorphism degree coefficient, water regime of soils, structural and functional organization of soil cover

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 17-04-02217). The authors thank L.V. Stepancova for support in studding of analytical diagnostic of waterlogging by coefficient (K_{I-II}), N.B. Khitrov and M.A. Smirnova for results discussion and to the Administration of the Tambovskoye Federal State Unitary Enterprise for the interest to the study.

¹ Dokuchaev Soil Science Institute, Department of Soil Agroecological Assessment and Agroecosystem Practice, Junior Research Scientist; e-mail: novichkova.ea@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, master student Dokuchaev Soil Science Institute, Department of Soil Agroecological Assessment and Agroecosystem Practice; Engineer; e-mail: nlozbenov@mail.ru

³ Dokuchaev Soil Science Institute, Deputy Director, PhD. in Geography; e-mail: daniilkozlov@gmail.com

REFERENCES

- Akhlyrtsev A.B. *Gidromorfnye pochvy i pereuvlazhnennye zemli lesostepi Russkoj ravniny* [Hydromorphic soils and wetlands of the forest steppe of the Russian plain]. Voronezh: Izdatel'stvo Voronezhskogo universiteta Publ. 2003. 224 p. (In Russian)
- Akhlyrtsev A.B., Aderikhin P.G., Akhlyrtsev B.P. *Lugovo-chernozemnye pochvy tsentralnoj chasti Russkoj ravniny* [The meadow chernozem soils of the central part of the Russian plain]. Voronezh: Izdatel'stvo Voronezhskogo universiteta Publ. 1981. 174 p. (In Russian)
- Bazykina G.S. *Analiz mnogoletnej dinamiki elementov vodnogo balansa tipichnyh chernozemov zapovednoj stepi (Kurskaya oblast)* [Analysis of the long-term dynamics of water balance components in typical chernozems of protected steppe area in the Kursk oblast] // *Eurasian Soil Science*. 2010. V. 43. № 12. P. 1362–1372. (In Russian)
- Beff L., Gunther T., Vandoorne B., Couvreur V., Javaux M. *Three-dimensional monitoring of soil water content in a maize field using Electrical Resistivity Tomography* // *Hydrol. Earth Syst. Sci*. 2013. V. 17. Iss. 2. P. 595–609. DOI: 10.5194/hess-17-595-2013
- Florinsky I.V. *Digital terrain analysis in soil science and geology*. Amsterdam: Elsevier – Academic Press. 2016. 2nd revised edition. 486 p.
- Gao X., Alvo M., Chen J., Li G. *Nonparametric Multiple Comparison Procedures for Unbalanced One-Way Factorial Designs* // *J. Statistical Planning and Inference*. 2008. № 138. P. 2574–2591.
- Golden Heather E., Lane Charles R., Amaty Devendra M., Bandilla Karl W., Hadas Raanan Kiperwas, Knightes Christopher D., Ssegane H. *Hydrologic connectivity between geographically isolated wetlands and surface water systems: A review of select modeling methods* // *Environmental Modelling & Software*. 2014. V. 53. P. 190–206.
- Levchenko E.A., Kozlov D.N., Smirnova M.A., Avdeeva T.N. *Diagnosticcheskie svojstva i klassifikatsiya pochv lesostepi Vorono-Tsninskogo mezhdurechia Privolzhskoj vozvyshennosti* [The diagnostic properties and classification of forest steppe soils at the Vorona-Tsna rivers interfluvium of Privolzhskaya Upland] // *Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*. 2017. V. 88. P. 3–26. doi: 10.19047/0136-1694-2017-88-3-26 (In Russian)
- Puzachenko Yu.G. *Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyah* [Mathematical methods in environmental and geographical studies]. M.: Academia, 2004. 416 p. (In Russian)
- Romanova T.A. *Vodnyj rezhim pochv Belarusi* [Water regime of soils in Belarus]. Minsk: Belarusian science, 2015. 144 p. (In Russian)
- Schwertmann U. *Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments* // *Iron in Soils and Clay Minerals. NATO ASI Series*. 1988. V. 217. P. 267–308.
- Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. *Fundamental quantitative methods of land surface analysis* // *Geoderma*. 2002. V. 107. № 1–2. P. 1–32.
- Stepantsova L.V. *Agrofizicheskie svojstva, gidrologicheskij rezhim i diagnostika chernozemovidnyh pochv severa Tambovskoj nizmennosti* [Agrophysical properties, water regime and diagnostics of chernozem-like soils in the northern part of the Tambov lowland]. Doctor's thesis. Moscow, 2012. 47 p. (In Russian)
- Stepantsova L.V., Krasin V.N. *Kolichestvennyj pokazatel glubiny zaleganiya gruntovyh vod v chernozemovidnyh pochvah severa Tambovskoj ravniny* [Quantitative indicator of the ground water level in chernozem-like soils of the northern part of the Tambov Plain] // *Vestnik MichGAU*. 2011. V. 1. № 2. P. 106–110. (In Russian)
- Stepantsova L.V., Krasin V.N., Krasina T.V. *Vliyanie gidromorfizma na frakcionnyj sostav organicheskogo veshchestva chernozemnyh pochv Tambovskoj ravniny* [Hydromorphism influence on the fractional composition of organic matter in the Chernozem soils of the Tambov Plain] // *Reflection of bio-, geo-, and anthropospheric interactions in soils and soil cover: a collection of materials V Int. scientific conference dedicated to the 85th anniversary of the department of soil science and soil ecology*. Tomsk: TGU. 2015. P. 117–120. (In Russian)
- Thompson A., Bell J.C. *Hydric soil indicators in Mollisol landscapes* // *Wetland Soils: Genesis, Hydrology, Landscapes, and Classification*. CRC Press. 2001. Ch. 17. P. 371–383.
- Vodnyj balans osnovnyh ekosistem Tsentralnoj lesostepi [Water balance of the main ecosystems of the central forest-steppe]. M.: Publ. House of the USSR Academy of Sciences. 1974. part 1. 282 p. (In Russian)
- Vodyanitsky Yu.N. *Novyj pokazatel gidromorfizma pochv po sostoyaniyu zheleza* [A new indicator of soil hydromorphism by the state of iron] // *Reports of the Russian academy of agricultural sciences*. 2007. № 4. P. 33–35. (In Russian)
- Vorobyeva I.B. *Osobennosti gidrotermicheskikh uslovij i organicheskoe veshchestvo pochv ostrovnogo lesostepi (Nazarovskaya kotlovina)* [Specific features of hydrothermal conditions and organic matter in soils of the island forest steppe (the Nazarov depression)] // *Arid Ecosystems*. 2013. V. 3. № 2. P. 77–84. (In Russian)
- Zaidel'man F.R. *Degradatsiya bogarnykh i oroshaemykh chernozemov pod vliyaniem pereuvlazhneniya i ih melioratsiya* [Degradation of rainfed and irrigated Chernozems under the impact of waterlogging and their reclamation]. Moscow: APR Publ. 2012. 212 p. (In Russian)
- Zaidel'man F.R. *Morfogleygenez, ego vizualnaya i analiticheskaya diagnostika* [Morphogleygenesis, its visual and analytic diagnostics] // *Eurasian Soil Science*. 2004. V. 37. № 4. P. 333–340. (In Russian)
- Zaidel'man F.R. *Estestvennoe i antropogennoe pereuvlazhnenie pochv* [Natural and anthropogenic waterlogging of soils]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat. 1992. 288 p. (In Russian)
- Zaidel'man F.R., Ogleznev A.K. *Kolichestvennoe opredelenie stepeni zabolochennosti pochv po svojstvam konkretnykh* [Quantitative determination of the degree of soil bogging according to the properties of concretions] // *Eurasian Soil Science*. 1971. № 10. P. 94–101. (In Russian)
- Zaidel'man F.R., Stepantsova L.V., Nikiforova A.S., Krasin V.N., Safronov P.B., Krasina T.V. *Genezis i degradatsiya chernozemov evropejskoj Rossii pod vliyaniem pereuvlazhneniya. Sposoby zaschity i melioratsii* [Genesis and degradation of Chernozems in European Russia due to excessive moistening. The ways of protection and amelioration]. Voronezh: Kvarta Publ. 2013. 352 p. (In Russian)

Received 13.07.2018

Revised 19.10.2018

Accepted 21.02.2019