

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ АГРОФИЗИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА

Предложен вероятностный подход к агрофизической оценке, основанный на анализе водно-воздушного режима почв. Задавая внешние исходные условия на верхней и нижней границах почвенного профиля (осадки, эвапотранспирация, отток и др.) и используя экспериментальные данные ОГХ и водопроницаемости, можно прогнозировать изменения влажности, оценивать и оптимизировать водно-воздушные условия роста растений. На примере почвенного покрова Владимирского ополья и Ивановской области показана высокая пространственная неоднородность агрофизических свойств.

Введение

Агрофизическая оценка территории включает в себя характеристику физического состояния почвенного покрова на момент исследования, выделение на основании полученной информации благоприятных и неблагоприятных для роста и развития растений зон, разработку рекомендаций по повышению эффективности устойчивости агроэкосистем и их агроэкологической безопасности. В большинстве случаев традиционные подходы к агрофизической оценке территории строятся на основе классификационных градаций отдельных свойств почвы и включают такие показатели, как объект (почва и культура) и оптимальные диапазоны значений физических свойств в пахотном слое, например плотность, пористость, сопротивление пенетрации, структурный и гранулометрический состав, коэффициент фильтрации и др. [4]. Часто в качестве обобщенного показателя физического состояния, оценки пригодности почвы для возделывания сельскохозяйственных культур принимают плотность почвы в силу ее достаточно легкого полевого определения. В качестве примера можно привести сводную шкалу А.Г. Бондарева и В.В. Медведева [7]. Однако необходим комплексный показатель, позволяющий учитывать всю совокупность основных агрофизических свойств. В.В. Медведев предложил использовать «индекс физического состояния» (ИФС), который позволяет в числовом выражении характеризовать не отдельное свойство почвы, а агрофизическое состояние в целом [13]. В качестве параметров автор предлагает применять широкий набор основных физических свойств почвы. Агрофизическая оценка состоит в определе-

нии ИФС как среднего геометрического отношений реальных значений данных свойств (X_1, X_2, \dots, X_n) к оптимальным ($X_{\text{опт } 1}, X_{\text{опт } 2}, \dots, X_{\text{опт } n}$): $\text{ИФС} = (X_1/X_{\text{опт } 1} * X_2/X_{\text{опт } 2} * \dots * X_n/X_{\text{опт } n})^{1/n}$, где n – число исследованных свойств. Чем ближе значение этого индекса к единице, тем физическое состояние почвы ближе к оптимальному.

В западной научной литературе комплексная агрофизическая характеристика пригодности почвы для развития и роста растений объединяет водоудерживающую способность почвы, сопротивление пенетрации и почвенную аэрацию [14]. Стоит отметить, что перечисленные подходы к оценке агрофизического состояния содержат ряд недостатков, так как анализ проводится по набору взаимосвязанных свойств, и при этом далеко не всегда их связи с плодородием почвы, а также с урожаем сельскохозяйственных культур линейные и возрастающие.

Эту задачу целесообразно решать путем анализа водно-воздушного режима почв, наиболее полно отражающего условия роста и развития растений. При этом перспективным представляется использование расчетных прогнозных моделей. Учитывая большую информативность кривой ОГХ, ряд авторов предлагает на ее основе различного рода математические модели, дающие возможность прогноза водно-воздушного режима [16].

Целью данной работы стала разработка нового подхода к агрофизической оценке почвенного покрова на основе прогнозных вероятностных расчетов водно-воздушного режима почв. При этом решались задачи детального агрофизического обследования и оценки почвенного покрова общеприняты-

ми методами, применения нового подхода на основе расчета водно-воздушного режима почв и анализа факторов, оказывающих доминирующее влияние на агрофизическое состояние ландшафтов.

Объекты и методы

Почвенный покров объектов исследования – серых лесных почв Владимирского ополья и дерново-подзолистых почв с текстурно-дифференцированным профилем Ивановской области – характеризуется высокой пространственной неоднородностью. Основными структурообразующими элементами почвенного покрова Владимирского ополья являются геохимически сопряженные пахотные серые лесные почвы, а также серые лесные почвы различной степени оподзоленности: слабооподзоленные, среднеоподзоленные и оподзоленные почвы, имеющие в составе своего профиля второй гумусовый горизонт (ВГГ). Почвенная карта-схема участка представлена на рис. 1.

Вторым объектом стали дерново-подзолистые почвы на двучленных отложениях Ивановской области, где глубина залегания подстилающего песчаного слоя в пределах исследуемого участка непостоянна и изменя-

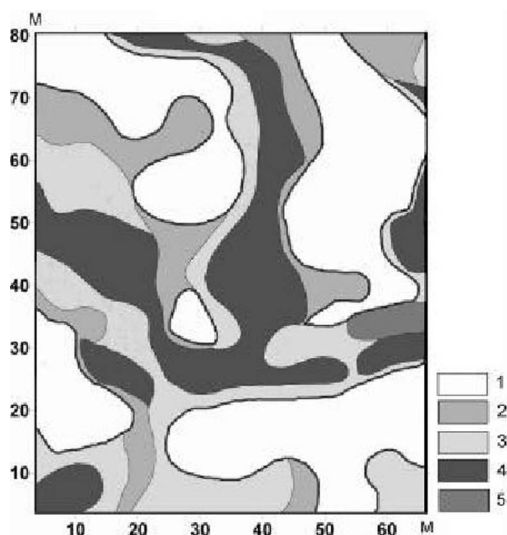


Рисунок 1. Почвенная карта экспериментального участка ОПХ Владимирского НИИСХ. Цифрами обозначены почвы: 1 – серая лесная; 2 – серая лесная слабооподзоленная; 3 – серая лесная среднеоподзоленная; 4 – серая лесная сильнооподзоленная с ВГГ; 5 – серая лесная остаточнок-карбонатная.

ется от 30 см до 80 см. Это неизбежно находит отражение в агрофизическом состоянии почвенного покрова (рис. 2).

Анализ физических свойств комплекса серых лесных почв Владимирского ополья свидетельствует о переуплотнении подпахотного горизонта в большей части участка. В наибольшей степени это проявляется в серых лесных остаточнок-карбонатных почвах, где значения возрастают до 1.40 г/см^3 , а минимальные значения характерны для серых лесных почв со вторым гумусовым горизонтом – 1.28 г/см^3 .

Наибольшие различия в плотности агрегатов получены в слое 40–50 см, где почвы сохраняют свои генетические особенности в отличие от верхнего пахотного слоя, претерпевшего значительные изменения и перемешивание в процессе длительного сельскохозяйственного использования территории ополья. При общем диапазоне варьирования значений от 1.22 г/см^3 до 1.89 г/см^3 минимум, как и с плотностью сложения, приурочен к серым лесным почвам со вторым гумусовым горизонтом, а максимальные показатели имеют остаточнок-карбонатные.

Сравнительный анализ значений пределов текучести ($W_{\text{тек}}$) и пластичности ($W_{\text{пласт}}$) в пахотном слое различных почвенных контуров показал, что средние по $W_{\text{тек}}$ варьируют в пределах от 27% (слабооподзоленная) до 29% (остаточнок-карбонатная). Средние значения $W_{\text{пласт}}$ возрастают в ряду от серой лесной неоподзоленной почвы (19%) к сильнооподзоленной (21%) и остаточнок-карбонатной (22%). Однако статистическая обработка данных в пределах каждого почвенного подтипа показала, что эти различия недостоверны. Размытость границ, отсутствие четких переходов между почвенными контурами в верхнем слое почв по значениям $W_{\text{тек}}$ и $W_{\text{пласт}}$, как и по другим физическим свойствам, – следствие уже отмеченного длительного сельскохозяйственного использования.

Комплексная количественная оценка агрофизического состояния проводилась с помощью подхода, предложенного В.В. Медведевым и рассмотренного нами выше. В слое 0–10 см для каждой точки получено отношение определенных физических свойств (плотность, границы пластичности, порис-

тость, фильтрация) к оптимальным и найдено их среднегеометрическое – индекс физического состояния.

Построив карту распределения по участку ИФС, можно отметить, что в целом характерны высокие значения этого показателя (0.79–0.99). Они равномерно разделяются по площади, однако можно выделить точки-экстремумы, при этом и минимальные (0.79–0.83), и максимальные (0.98–0.99) значения могут принадлежать одной почвенной разности. Это наблюдается в неоподзоленной, слабо- и среднеподзоленной почвах, лишь почвы со вторым гумусовым горизонтом характеризуются выравненными значениями (0.94–0.96). Это отмеченные выше недостатки традиционного почвенно-генетического подхода к агрофизической характеристике, когда свойства почвы в ключевых точках почвенных контуров приписываются всей территории контура, не предполагая их изменения в ландшафте. Таким образом, исключается влияние технологических, агрохимических и других факторов, не связанных со структурой почвенного покрова.

Выделение зон, различающихся по отдельным физическим свойствам, дает качественную характеристику состояния почв, не позволяя дать точной количественной оценки всего покрова и прогноза его поведения в отношении к растению.

Вероятностный подход к агрофизической оценке, основанный на анализе водно-воздушного режима почв, состоит в расчете элементов режима по экспериментальным данным ОГХ и водопроницаемости. Задавая внешние исходные условия или, как принято в математическом моделировании, условия на верхней и нижней границах почвенного профиля (осадки, эвапотранспирация и отток), можно прогнозировать изменения влажности, т.е. производить прогнозный режимный расчет. В нашем алгоритме начальным условием было взято распределение влажности по профилю, равное НВ (аналог начала послеполивного периода или весенней влагозарядки). Полный расчетный цикл составлял 25 дней: в течение первых 12 суток с верхней границы испарялось количество воды, соответствующее

разнице запасов от НВ пропущено до 0.7 НВ в слое 0–50 см; на 13-й день в течение суток задавался полив, равный указанному диапазону, с 14-го дня вновь испарение в течение 12 дней до запасов 0.7 НВ. Этот алгоритм условий на верхней границе должен в лучшей степени отражать послонное чередование физических свойств, а именно их водоудерживание и проводимость. На нижней границе профиля задавалось условие свободного оттока, что соответствует автоморфным почвам.

Указанный алгоритм расчета имеет следующие преимущества перед традиционными оценками агрофизического состояния почв:

1 – оценивают не набор свойств, имеющих, как правило, нелинейное влияние на продукционный процесс, а именно недостатки влаги и воздуха, связанные с особенностями послонного распределения физических свойств в почвенном профиле;

2 – оценивают не отдельный (обычно пахотный) слой, а весь почвенный профиль, с его особенностями водоудерживания и водопроницаемости как основными свойствами, определяющими водо- и воздухообмен.

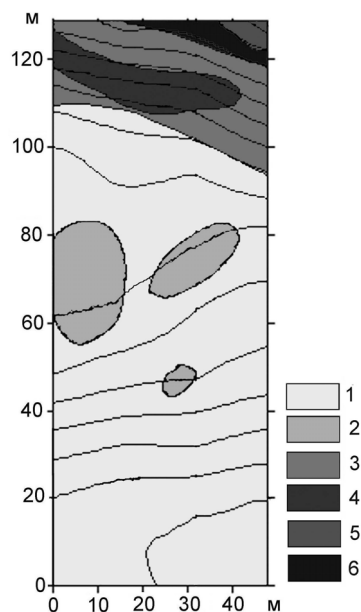


Рисунок 2. Почвенная карта экспериментального участка ОПХ Ивановского НИИСХ. Цифрами обозначены почвы: 1 – дерново-слабоподзолистые; 2 – дерново-среднеподзолистые; 3 – дерново-слабоподзолистые слабосмытые; 4 – дерново-слабоподзолистые среднесмытые; 5 – дерново-слабоподзолистые намытые; 6 – дерново-слабоподзолистые глубокоглеевые.

При унифицированных условиях на верхней и нижней границах почвенной толщи, что позволило задать равные «стартовые» возможности для всех точек почвенного покрова, были получены послойные динамики влажности (давления влаги) за определенный период. Оценка водно-воздушных условий с точки зрения оптимальности для растений заключалась в подсчете вероятности появления в различных слоях и в почвенном профиле в целом неблагоприятных периодов:

1 – недостатка влаги в почве или вероятности появления величин менее 70% от наименьшей влагоемкости (НВ) в случае оценки оптимальной влагообеспеченности растений;

2 – недостаточной аэрации или вероятности появления воздухосодержания менее 10%.

Чем их меньше, тем лучше агрофизическое состояние.

После прогнозного расчета водно-воздушного режима в программе FAUST для корнеобитаемого слоя 0–50 см с шагом 10 см были получены вероятности появления периодов недостатка влаги (ВН) и переувлажнения (ВП) как основных количественных характеристик водного режима.

Анализируя полученные данные (рис. 3), можно отметить, что зоны, характеризующиеся минимальной вероятностью появления неблагоприятных (и засушливых, и переувлажненных) периодов, приурочены к кон-

турам серых лесных почв со вторым гумусовым горизонтом (рис. 1).

Наибольшие вероятности переувлажнения (ВП) приходятся на неоподзоленные, слабо- и среднеподзоленные почвы. Максимальные значения вероятности их появления доходят до 0.08, что, по-видимому, является следствием низкой водопроницаемости этих почв.

Вероятность появления участка засушливых периодов и их длительность в целом для участка гораздо меньше: ВН не более 0.01. Максимум также приходится на неоподзоленные и слабоподзоленные почвенные разности, что можно объяснить их высокой плотностью. Обладая хорошо развитой сетью преимущественно тонких пор и, следовательно, большей гидравлической проводимостью в области низких значений влажности они по капиллярам легко проводят влагу к верхним слоям, где та быстро испаряется. Такие засушенные участки негативно влияют на урожайность поля в целом, поскольку, обладая высокой влагопроводностью, способствуют подтягиванию влаги с окружающего почвенного пространства и ее быстрому испарению.

Математическая обработка показала значимую корреляцию вероятностей появления обеих критических величин – ВП и ВН ($K_r = 0.51$). Вычитая полученные значения ВП и ВН из общего объема данных (вероятность = 1) и найдя их среднее геометрическое, был получен показатель – индекс

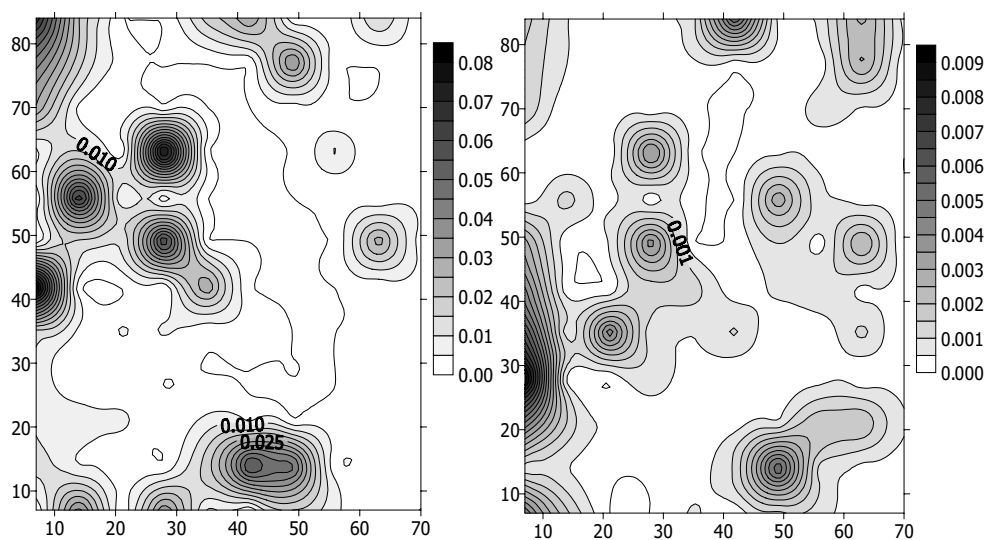


Рисунок 3. Вероятность появления переувлажнения (а) и иссушения (б) для слоя 0–50 см серых лесных почв Владимирского ополья.

оптимальности водно-воздушного режима (ИОР): $\text{ИОР} = ((1 - \text{ВП}) * (1 - \text{ВН}))^{1/2}$.

Почвы экспериментального участка имеют достаточно высокие значения ИОР: 0.96–0.99 (рис. 4). При этом они слабо варьируют в пределах изученного агроландшафта. Такой высокий ИОР и его слабая дифференциация в почвенном покрове участка объясняются, вероятно, «мягкими», «щадящими» условиями, заданными в алгоритме модельных расчетов: норма орошения рассчитывалась по самым плотным – серым лесным почвам, т.е. была минимальна из всех возможных вариантов и одинакова по всему участку. Можно предположить, что в более «жестких» условиях, т.е. при большей норме осадков и эвапотранспирации, рассчитанных по рыхлым почвам, например, со вторым гумусовым горизонтом различия будут более яркими. В частности, в тех же серых лесных неоподзоленных почвах следует ожидать продолжительные периоды переувлажнения и чрезмерного иссушения.

Несмотря на выравненную в целом агрофизическую оценку, можно выделить зоны с максимальным ИОР, приуроченные к серым лесным почвам со вторым гумусовым горизонтом (ИОР = 1). Следовательно, в агроландшафте Владимирского ополья именно они формируют водно-воздушный режим, в наилучшей степени отвечающий требованиям роста и развития сельскохозяйственных растений. Зоны с минимальным значением ИОР (0.88) приурочены к серым лесным неоподзоленным почвам.

Сравнение изоплет значений урожайности и ИОР позволяет отметить соответствие контуров наибольшей урожайности овса (29–33 ц/га) и участков с индексом, близким или равным единице (1–0.99), тогда как на участках с ИОР 0.91–0.88 она составляет 13–19 ц/га. Однако при математической обработке данных в программе «STATISTICA» значимой корреляции ИОР ни с почвенными контурами, ни с урожайностью не выявлено. По-видимому, продуктивность данного агроландшафта лимитируют другие факторы, не зависящие от агрофизического состояния и варьирующие по площади участка, например содержание питательных элементов. Это соотносится с данни-

ми Н.Ф. Хохлова [21], который на примере многолетних исследований показал, что плодородие не всегда пропорционально связано с физическим состоянием почв.

Проведенные по аналогичной методике ландшафтно-агрофизические исследования дерново-подзолистых почв на двучленных отложениях Ивановской области и последующий анализ значений показали, что в почвенном покрове отчетливо выделяются три зоны, в которых при формировании агрофизических условий основная роль принадлежит глубине залегания песка и уровню грунтовых вод. В частности, переуплотнение почвы в верхней части склона (нижняя часть карты) с близким залеганием песка связано с тем, что песок является жесткой, слабоуплотняемой «подложкой» и деформационное воздействие техники не распределяется вглубь профиля, а аккумулируется в верхнем слое.

Прогнозный расчет элементов водно-воздушного режима агроландшафта Ивановской области свидетельствует о незначительной вероятности появления в почвенном покрове периодов недостатка влаги (ВН) (рис. 5).

Зона, где они все же могут наблюдаться (максимум вероятности 0.07), расположена в верхней части склона, с близким залеганием песка. Вероятность переувлажнения (ВП) проявляется интенсивнее – значение медиа-

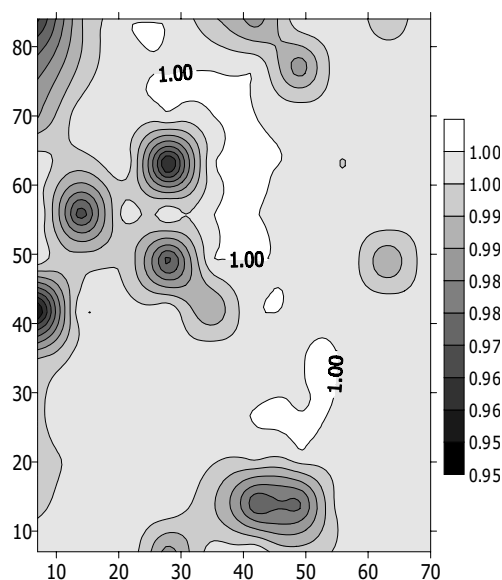


Рисунок 4. Индекс оптимальности водно-воздушного режима для слоя 0-50 см серых лесных почв Владимирского ополья.

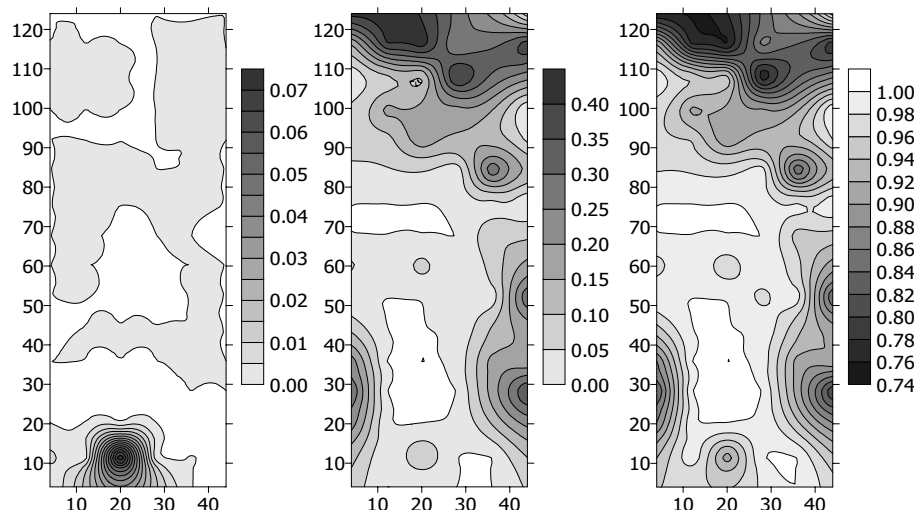


Рисунок 5. Вероятность появления недостатка влаги (а), избыточного увлажнения (б) и ИОР (в) в слое 0–50 см дерново-подзолистых почв ОПХ Ивановского НИИСХ.

ны 0.03, а максимум превышает 0.40. Наибольшие значения закономерно приурочены к нижней части поля (верхняя часть карты) с близким уровнем грунтовых вод. Здесь вероятность переувлажнения достигает 0.42. Однако переувлажнение может проявляться и в верхней части поля, что связано, по-видимому, со слоистой природой близко залегающей песчаной толщи. В агрофизической оценке ландшафта это играет доминирующую роль – распределение значений ИОР практически полностью совпадает с распределением ВП. В целом для участка характерен высокий индекс оптимальности режима (медиана 0.98). Напомним, что минимум для серых лесных почв составил 0.88. Минимальные значения в некоторых точках нижней части поля (0.74–0.78) связаны с высокой вероятностью переувлажнения.

Приоритет во влиянии на агрофизическую оценку (ИОР) среди изученных свойств имеют: в комплексе серых лесных почв – плотность подпахотного слоя ($K_r = -0.26$) и плотность агрегатов ($K_r = -0.31$), в дерново-подзолистых почвах – фильтрация поверхностного слоя ($K_r = 0.30$), плотность почвы и значения НВ.

Результаты исследований показали, что для почвенного покрова Владимирского ополья и Ивановской области характерна почвенная неоднородность, сопровождаемая высокой неоднородностью физических свойств, хотя их изменение в пространстве не всегда совпадает

с границами почвенных контуров. Традиционные подходы к агрофизической оценке позволяют лишь характеризовать свойства отдельных горизонтов в конкретный момент времени. Ландшафтно-агрофизический подход и применение прогнозных расчетов водно-воздушного режима позволяют дать интегральную количественную характеристику латеральной агрофизической картины, которая в большинстве случаев отлична от пространственных картин распределения отдельных физических показателей. Такая долгосрочная прогнозная оценка позволит разработать более точные рекомендации по оптимизации водно-воздушного режима и улучшению роста и развития сельскохозяйственных культур в адаптивно-ландшафтном земледелии.

Выводы

1. Предложен ландшафтно-агрофизический подход к оценке агрофизического состояния, включающий детальное пространственно-определенное обследование и прогнозную оценку водно-воздушного режима почв. В качестве критерия оценки наиболее обоснованным является использование индекса оптимальности режима (ИОР).

2. Почвенный покров агроландшафтов Владимирского ополья и Ивановской области характеризуется пространственной неоднородностью, сопровождаемой высокой неоднородностью физических свойств, однако границы почвенных контуров не всегда совпадают

с латеральной изменчивостью физических свойств.

3. В почвенном покрове Владимирского ополья, имеющем в целом благоприятное агрофизическое состояние и высокий ИОР (0.99–0.88), можно выделить зоны, приуроченные к серым лесным почвам со вторым гумусовым горизонтом. Именно они формируют в агроландшафте водно-воздушный режим, в наилучшей степени отвечающий требованиям роста и развития сельскохозяйственных растений (ИОР = 1).

Зоны с минимальным значением ИОР (0.88) приурочены к серым лесным неоподзоленным почвам.

4. При формировании агрофизических условий агроландшафта Ивановской области в дерново-подзолистых почвах основная роль принадлежит глубине залегания песчаной толщи и уровню грунтовых вод. В целом для этих почв характерен высокий ИОР, хотя при близком залегании грунтовых вод, где высока вероятность переувлажнения, он снижается до 0.74–0.78.

Список использованной литературы:

1. Медведев В.В. и др. Критерии оценки пригодности земель Украины для возделывания зерновых культур // Почвоведение, 2002, № 2.
2. Бондарев А.Г., Медведев В.В. Некоторые пути определения оптимальных параметров агрофизических свойств почв // Теоретические основы и методы определения оптимальных параметров свойств почв. Тр. Почв. ин-та им.В.В. Докучаева. 1980. С. 85–98.
3. Медведев В.В. Оптимизация агрофизических свойств черноземов. М.: Агропромиздат, 1988, 157 с.
4. Letey J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. Adv. Soil Sci. 1:277-294.
5. Шейн Е.В., Махновецкая С.В. Агрофизическая оценка почв на основе анализа прогнозного водно-воздушного режима // Вестн. Моск. ун-та, сер. 17, Почвовед. 1995. № 2.
6. Хохлов Н.Ф. Морфологические основы совершенствования агрофизической оценки элементов систем земледелия в длительном полевом опыте. Автореф. на соискание уч. ст. докт. с/х наук, М.: МСХ им. Тимирязева, 2001.