

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ АГРОФИЗИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ  
ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА**

**Гончаров В.М., Бенинг В.Е.**  
Факультет почвоведения,  
МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

---

*Поступила в редакцию 12.02.2010, после переработки 25.03.2010.*

---

Предложен вероятностный подход к агрофизической оценке, основанный на анализе водно-воздушного режима почв. Задавая в математических моделях 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.

A stochastic approach to agrophysical assessment, based on the analysis of water and air regimes in soils, is proposed. External initial conditions on upper and lower boundaries of soil profile (precipitation, evapotranspiration, water outflow etc.) and experimental water retention and permeability data set in mathematical models allow to predict moisture changes, as well as to evaluate and optimize water and air conditions of plant growth. Using data on Vladimir Opolie and Ivanovo region soil cover as an example, a high heterogeneity of agrophysical properties is shown.

**Ключевые слова:** математическая модель, вероятность, агрофизическая оценка, водно-воздушный режим, расчет, прогноз.

**Keywords:** mathematical model, probability, agrophysics estimation, aquatic-air mode, calculation, prognosis.

## **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 составы, коэффициент фильтрации и др. [3]. 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 [1]. 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 [2]. В качестве параметров автор предлагает применять широкий набор основных физических свойств почв. Агрофизическая оценка состоит в определении ИФС, как среднего геометрического отношений реальных значений данных свойств ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ) к оптимальным ( $X_{\text{опт1}}, X_{\text{опт2}}, \dots, X_{\text{опт}n}$ ):  $\text{ИФС} = (X_1/X_{\text{опт1}} * X_2/X_{\text{опт2}} * \dots * X_n/X_{\text{опт}n})^{1/n}$ , 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 [6]. 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 [5].

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

## 1. 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.

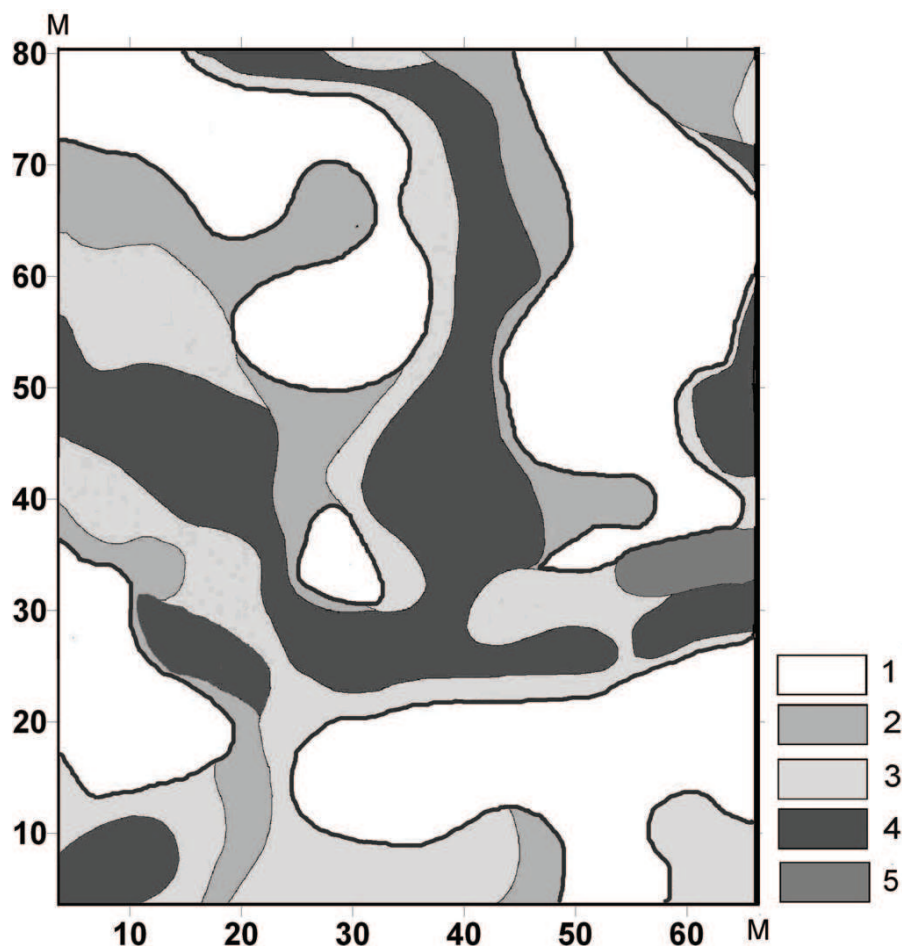


Рис. 1: Почвенная карта экспериментального участка ОПХ Владимирского НИИСХ. Цифрами обозначены почвы: 1 – серая лесная; 2 – серая лесная слабооподзоленная; 3 – серая лесная среднеоподзоленная; 4 – серая лесная сильнооподзоленная с ВГГ; 5 – серая лесная остаточно-карбонатная.

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

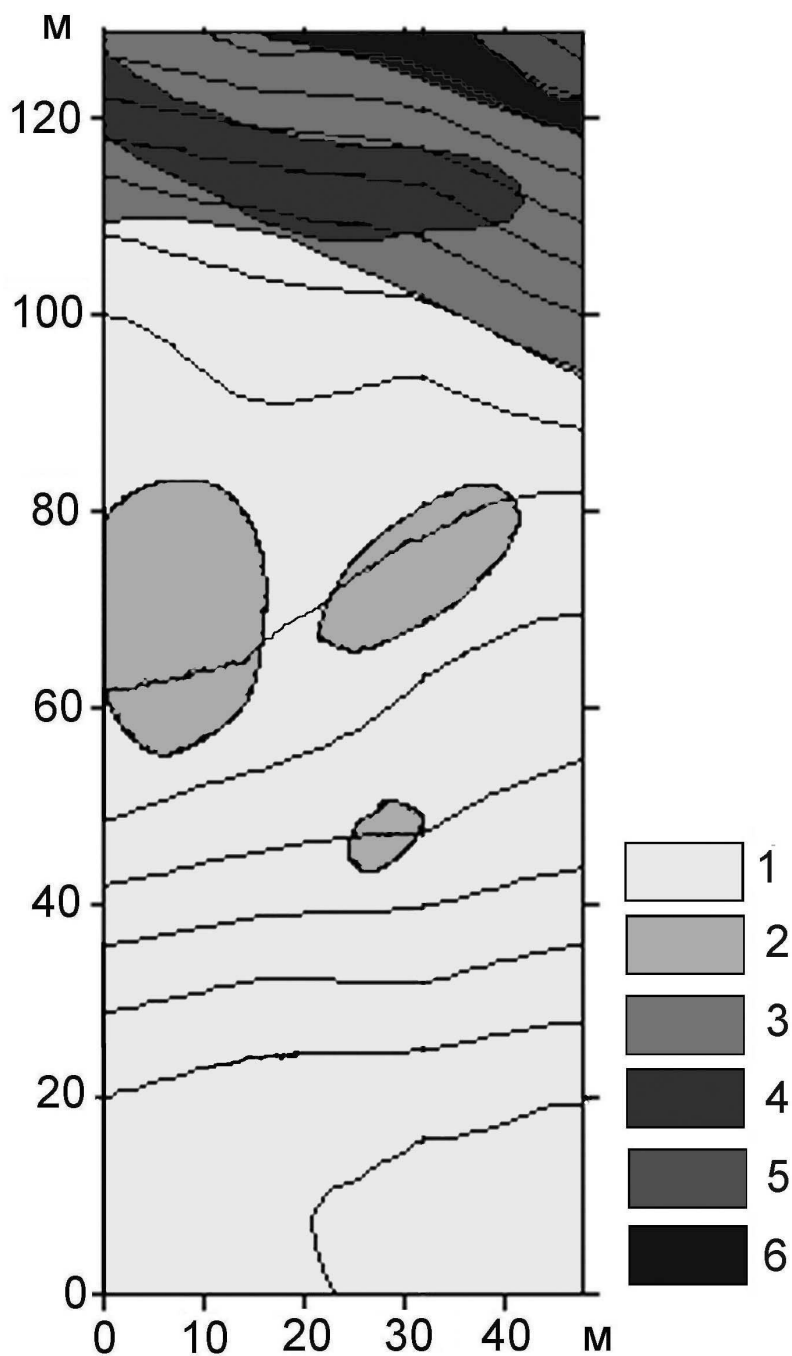


Рис. 2: Почвенная карта экспериментального участка ОПХ Ивановского НИИСХ. Цифрами обозначены почвы: 1 – дерново-слабоподзолистые; 2 – дерново-среднеподзолистые; 3 – дерново-слабоподзолистые слабосмытые; 4 – дерново-слабоподзолистые среднесмытые; 5 – дерново-слабоподзолистые намывные; 6 – дерново-слабоподзолистые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

участка. В наибольшей степени это проявляется в серых лесных остаточного-карбонатных почвах, где значения возрастают до  $1.40 \text{ г/см}^3$ , а минимальные значения характерны для серых лесных почв со вторым гумусовым горизонтом –  $1.28 \text{ г/см}^3$ .

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  $1.22 \text{ г/см}^3$  до  $1.89 \text{ г/см}^3$  минимум, как и с плотностью сложения, приурочен к серым лесным почвам со вторым гумусовым горизонтом, а максимальные показатели имеют остаточного-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% (слабоподзоленная) до 29% (остаточного-карбонатная). Средние значения  $W_{\text{пласт}}$  возрастают в ряду от серой лесной неоподзоленной почвы (19%) к сильноподзоленной (21%) и остаточного-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, пористость, 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 распределяются 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 среднеоподзоленной почвах, лишь почвы со вторым гумусовым горизонтом характеризуются выровненными 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.

## 2. Вероятностный подход к агрофизической оценке

В основу предлагаемого в работе подхода к оценке агрофизических условий положен анализ водно-воздушного режима, заключающийся 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 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 послойное 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 послойного 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.

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

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

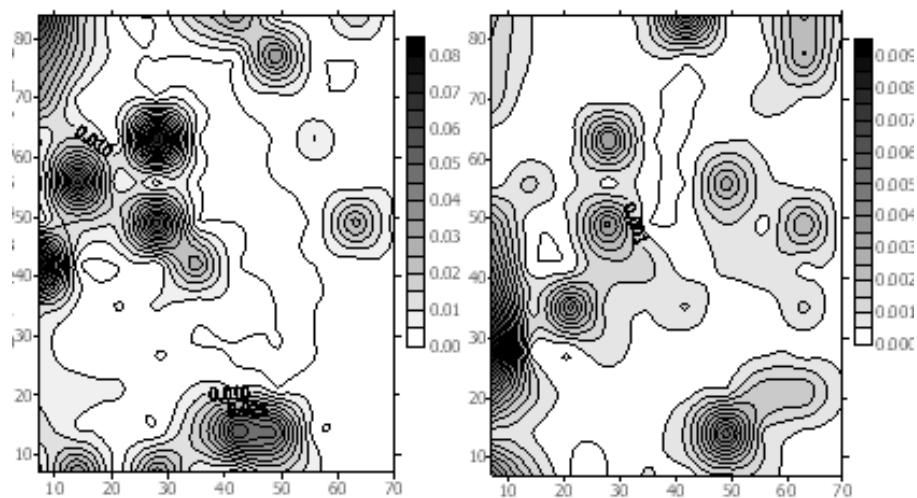


Рис. 3: Вероятность появления переувлажнения (а) и иссушения (б) для слоя 0–50 см серых лесных почв Владимирского ополья.

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 иссушенные 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 ( $r=0.51$ ). Вычитая полученные значения ВП и ВН из общего объема данных (вероятность=1) и найдя их среднее геометрическое, был получен показатель – индекс 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 объясняется, 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. 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 выровненную, в целом, агрофизическую оценку, можно выделить

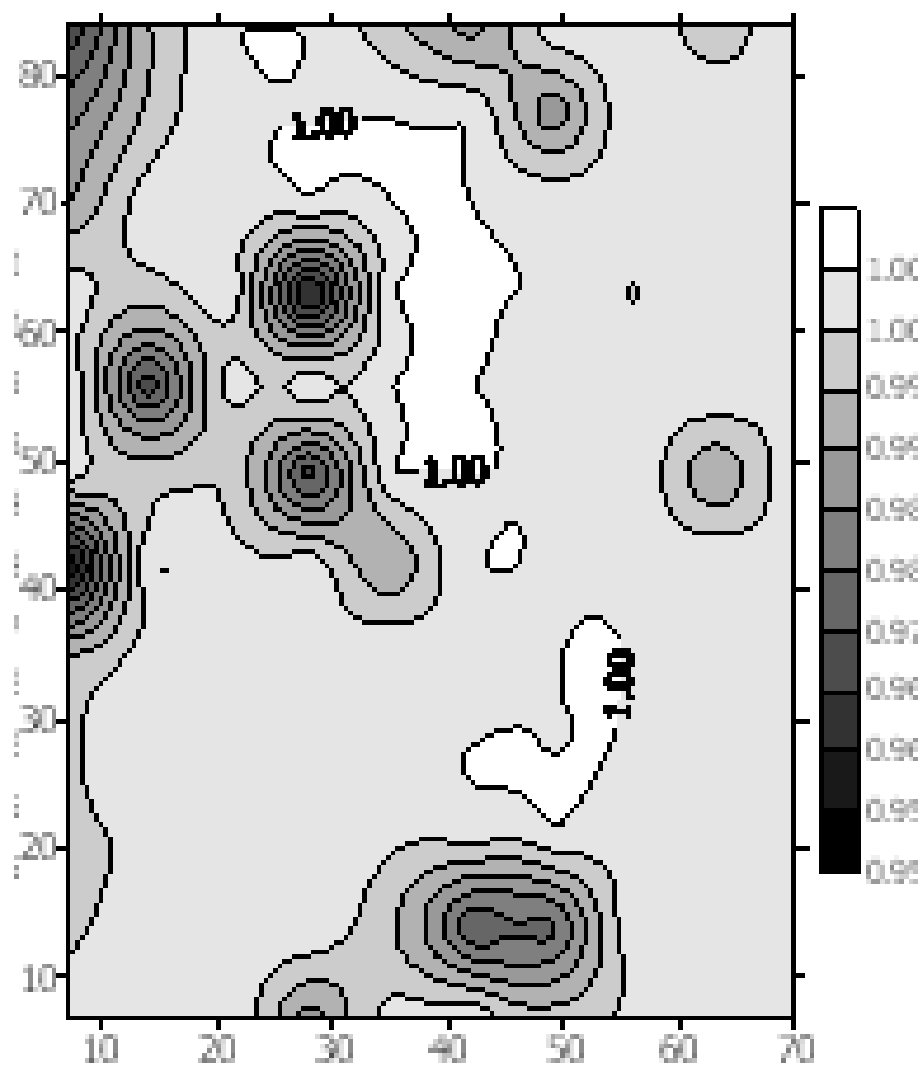


Рис. 4: Индекс оптимальности водно-воздушного режима для слоя 0-50 см серых лесных почв Владимирского ополья.



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 данными Н.Ф. Хохлова [4], 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 медианы 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 ( $r=-0.26$ ) и плотность агрегатов ( $r=-0.31$ ), в дерново-подзолистых почвах – фильтрация поверхностного слоя ( $r=0.30$ ), плотность почвы и значения НВ.

Результаты исследований показали, что для почвенного покрова Владимирско-

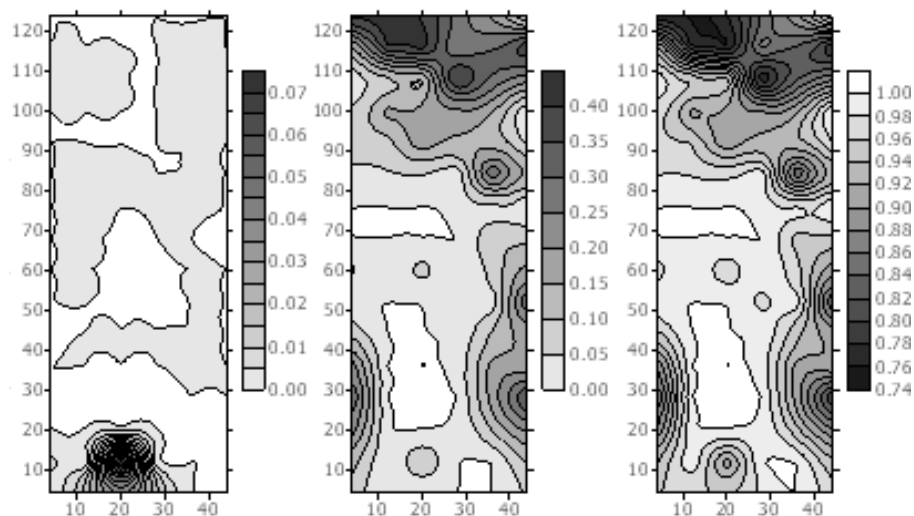


Рис. 5: Вероятность появления недостатка влаги (а), избыточного увлажнения (б) и ИОР (в) в слое 0–50 см дерново-подзолистых почв ОПХ Ивановского НИИСХ.

го 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 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 агрофизической 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.

### Заключение

В агроэкологических исследованиях актуальной остается задача агрофизической оценки территории, включающей 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 устойчивости агроэкосистем и их агроэкологической безопасности. 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. Рассматривая в качестве критерия оценки агрофизических условий прогнозный расчет элементов водно-воздушного режима, авторы предлагают использовать вероятность возникновения оптимальных и неблагоприятных периодов - индекс оптимальности режима (ИОР).

### Список литературы

- [1] 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.
- [2] Медведев В.В. Оптимизация агрофизических свойств черноземов. М., Агропромиздат, 1988, 157 с.
- [3] Медведев В.В. и др. Критерии оценки пригодности земель Украины для возделывания зерновых культур // Почвоведение, 2002, № 2.
- [4] 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.

- [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] Letey J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. Adv. Soil Sci. 1:277-294.