

УДК 626.86

**МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ
ПО СОСТОЯНИЮ ВОДНОГО РЕЖИМА НА МЕЛИОРИРОВАННЫХ ЗЕМЛЯХ**

А.В. Копытовских, *доцент*

(Белорусский государственный экономический университет, г. Пинск)

Состояние водного режима, оцениваемое для различных мелиоративных объектов, является одним из наиболее существенных критериев эффективности мелиорации в целом [1]. В данном случае под объектом может пониматься как отдельное сельскохозяйственное поле (контур, участок), так и в более укрупненном масштабе – сельскохозяйственные угодья отдельного хозяйства или часть земель региона (района, области), выделенные по тем или иным классификационным признакам из общего массива, например, по генезису почв и их гранулометрическому составу, степени заболоченности, конструкциям применяемых мелиоративных систем и др.

По нашему мнению, в качестве объективного показателя работы мелиоративных объектов по показателям влажности почвы может выступать характеристика надежности, под которой понимается безотказная работа объекта с заданной вероятностью P в течение срока T . Иначе говоря, объект будет работать надежно, если в течение требуемого срока с заданной вероятностью влажность почвы не превысит допустимого уровня максимальных и минимальных критических значений. Таким образом, решение вопроса о надежности работы мелиоративных объектов по показателям влажности почвы находится в плоскости решения задач теории случайных функций или, конкретнее, теории выбросов.

Для оценки возможности применения теории случайных функций к решению поставленной задачи требуется оценить распределение случайного процесса изменения влажности почвы во времени. Исследованиям динамики увлажнения почвы посвящены работы многих авторов. В частности, Ж.А. Капилевич, А.В. Высоченко и Ш.И. Брусиловским показано, что распределение влажности на многолетнем временном интервале удовлетворительно описывается нормальным законом распределения, для которого авторами в зависимости от гранулометрического состава почв приводятся основные статистические моменты. Принимая поток событий стационарным, авторами с помощью гармонического анализа при использовании интеграла Фурье получена математическая модель для прогноза влажности почвы во времени [2]. На основании полученных Д.Б. Циприсом и В.И. Ревутом многолетних статистических данных о влажности почвы авторами сделано заключение о допустимости использования нормального закона распределения этой величины по площади сельскохозяйственных угодий [3]. Приведенные выводы дают определенные основания для использования в расчетах основных положений теории стохастических процессов.

Таким образом, надежность работы мелиоративного объекта по показателям влажности почвы можно охарактеризовать вероятностью не превышения влажностью почвы допустимых значений. Если значения этой вероятности близки к 1, то рассматриваемое событие (непревышение влажности) произойдет обязательно. В случае же вероятности, близкой к нулю, событие не произойдет, т.е. надежная работа объекта обеспечена не будет. Таким образом, если вероятность P непревышения влажности почвы W допустимых ее значений W_d в течение заданного срока T имеет значение не менее, чем заданная вероятность P , объект работает надежно, т.е.

$$P \geq P(W \leq W_d). \quad (1)$$

Учитывая нормальный закон распределения влажности почвы во времени и принимая условно эту характеристику постоянной на площади участка, запишем выражение для плотности распределения влажности на временном интервале

$$f(W) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(W - \bar{W})^2}{2\sigma^2} \right], \quad (2)$$

где $f(W)$ – плотность распределения влажности во времени;

W – влажность почвы в любой момент времени;

\bar{W} – математическое ожидание влажности;

σ – стандартное отклонение влажности.

Поскольку достижение критических значений влажности, при которых происходит резкое снижение урожайности или гибель сельскохозяйственных культур, является достаточно редким событием, процесс наступления неравенства $W > W_d$ можно считать Пуассоновским законом распределения [4].

$$P_n = \frac{(\mu T)^n}{n!} \exp(-\mu T), \quad (3)$$

где P_n – вероятность того, что за время T произойдет n выбросов случайной функции влажности $W(t)$ за уровень W_d ;

μ – средняя частота выбросов $W(t)$ за уровень W_d .

Вероятность отсутствия указанных выбросов за время T , т.е. функция надежности, при которой $n=0$, запишется в следующем виде:

$$P = \exp(-\mu T). \quad (4)$$

Определить среднее число выбросов случайной функции за допустимый уровень несложно, допуская процесс изменения величины влажности стационарным, подчиняющимся нормальному закону распределения. При этом выбросом случайной функции за данный уровень « α » называется пересечение графиком этой функции горизонтальной прямой, отстоящей от оси на расстоянии « α ».

Из теории случайных функций известно, что среднее число выбросов n_α за время T и средняя длительность выброса τ соответственно равны

$$\bar{n}_\alpha = T \int_0^\infty \int_0^\infty v f(\alpha, v) \partial v, \quad (5)$$

$$\bar{\tau} = \frac{\int_0^\infty f(x) \partial x}{\int_0^\infty \int_0^\infty v f(\alpha, v) \partial v}, \quad (6)$$

где V – скорость случайной функции x [5].

Средняя частота выбросов для стационарного процесса определяется выражением

$$\bar{\mu}_\alpha = \frac{\bar{n}_\alpha}{T}, \quad (7)$$

или

$$\bar{\mu}_\alpha = \int_0^\infty \int_0^\infty v f(\alpha, v) \partial v. \quad (8)$$

Двухмерная плотность распределения вероятности $f(x, V)$ в данном случае распадается на произведение нормальных плотностей для x и V

$$f(x, V) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right] \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{V^2}{2\sigma_v^2}\right], \quad (9)$$

где дисперсия скорости изменения ординаты случайной функции σ_v равна значению корреляционной функции скорости в нуле, а математическое ожидание V_t равно нулю.

После подстановки (9) в (8) получаем

$$\bar{\mu}_\alpha = \frac{\sigma_v}{2\pi\sigma_x} \exp\left[-\frac{(\alpha - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right]. \quad (10)$$

После подстановки (9) в (6) имеем

$$\bar{\tau} = \pi \frac{\sigma_x}{\sigma_v} \exp\left[\frac{(\alpha - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right] \left[1 - \Phi\left(-\frac{\alpha - \bar{x}}{\sigma_x}\right)\right], \quad (11)$$

где Φ – интегральная функция Лапласа.

Если рассматривать выбросы за нулевой (средний) уровень, т.е. при $\alpha = \bar{x}$, формула (11) упрощается

$$\bar{\tau} = \pi \frac{\sigma_x}{\sigma_v}. \quad (12)$$

Из теории случайных функций известно [5]:

$$\frac{\sigma_v}{\sigma_x} \approx 2\pi\bar{\mu}_0, \quad (13)$$

$$\bar{\mu}_0 = \frac{N_0}{T_0}, \quad (14)$$

где N_0 – среднее число нулей случайного процесса за время T_0 .

Подстановка (13) в (10) дает выражение для расчета среднего числа выбросов случайной функции

$$\bar{\mu}_x = \bar{\mu}_0 \exp\left[-\frac{(\alpha - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right]. \quad (15)$$

Для влажности почвы можно записать

$$\mu = \bar{\mu} \exp\left[-\frac{(W_d - \bar{W})^2}{2\sigma^2}\right], \quad (16)$$

где W_d – допустимый (возможный) уровень влажности, соответствующий частоте μ .

В результате совместного решения (16) и (4) получаем выражение для расчета надежности работы участка земель по влажности почвы

$$P = \exp\left\{-\frac{\bar{\mu} T}{\exp\left[\frac{(W_d - \bar{W})^2}{2\sigma^2}\right]}\right\}. \quad (17)$$

Решение (16) и (4) относительно W_d дает расчетную формулу для определения возможных максимальных значений влажности почвы с вероятностью P .

$$W_d^{\max} = \bar{W} + \sigma \sqrt{2 \ln\left[\frac{\bar{\mu} T}{\ln(1/P)}\right]}. \quad (18)$$

Учитывая, что нормальное распределение симметрично относительно математического ожидания, для минимального предела влажности можно записать

$$W_d^{\min} = \bar{W} - \sigma \sqrt{2 \ln\left[\frac{\bar{\mu} T}{\ln(1/P)}\right]}. \quad (19)$$

Зависимости (17)–(19) могут использоваться для расчетов в случае, если влажность почвы по площади участка колеблется вокруг ее среднего значения с небольшим отклонением, т.е. когда стандартное отклонение влажности по площади $\sigma_s \rightarrow 0$. На практике такие участки встречаются редко. Они, как правило, имеют небольшие размеры, хорошо спланированную, выровненную, безуклонную или малоуклонную поверхность, находятся в пределах одного почвенного покрова.

Сельхозугодья, особенно в условиях холмисто-западного рельефа и сложного почвенного покрова, могут иметь значительные отклонения по влажности почвы в пределах поля. При расчете таких объектов необходим учет этих отклонений.

Уравнение закона изменения среднего числа выбросов за уровень W во времени имеет следующий вид:

$$\bar{\mu}_t = \bar{\mu} \exp\left[-\frac{(W - \bar{W})^2}{2\sigma_t^2}\right], \quad (20)$$

где $\bar{\mu}$ – средняя частота, устанавливаемая по зависимости (14);

σ_t – стандартное отклонение влажности почвы во времени t .

Как отмечено выше, распределение влажности почвы по площади для любого периода времени можно также описать нормальным законом распределения. Функция плотности для уровня влажности W записывается в виде

$$f(W) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(W - \bar{W}_{St})^2}{2\sigma_s^2}\right], \quad (21)$$

где \bar{W}_{St} – средняя влажность почвы на площади в момент времени t ;

σ_s – стандартное отклонение влажности по площади S .

Средняя частота выбросов функции может быть установлена по выражению [6]:

$$\mu = \int_0^{\infty} \bar{\mu}_t f(W) \partial W \quad (22)$$

или

$$\begin{aligned} \mu &= \int_0^{\infty} \bar{\mu} \exp\left[-\frac{(W - \bar{W})^2}{2\sigma_t^2}\right] \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(W - \bar{W}_{St})^2}{2\sigma_s^2}\right] \partial W = \\ &= \frac{\bar{\mu}}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{(W - \bar{W})^2}{2\sigma_t^2} - \frac{(W - \bar{W}_{St})^2}{2\sigma_s^2}\right] \partial W. \end{aligned} \quad (23)$$

Последнюю зависимость можно представить следующим образом:

$$\mu = \frac{\bar{\mu}}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{(W - \alpha)^2}{2\beta} + \frac{(\bar{W}_{St} - W)^2}{2(\sigma_t^2 + \sigma_s^2)}\right)\right] \partial W, \quad (24)$$

где

$$\alpha = \frac{\sigma_s^2 \bar{W} + \sigma_t^2 \bar{W}_{St}}{\sigma_s^2 + \sigma_t^2}, \quad \beta = \frac{\sigma_s^2 \sigma_t^2}{\sigma_s^2 + \sigma_t^2}.$$

Обозначим

$$I = \frac{1}{\sqrt{2\pi\beta}} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{(W - \alpha)^2}{2\beta}\right] \partial W.$$

При нормальном законе распределения, согласно правилу трех сигм,

$$\alpha = 3\sqrt{\beta}, I \approx 1.$$

Поскольку значение влажности W_{St} является для вероятности P средним допустимым значением влажности, обозначив допустимый уровень влажности почвы $\bar{W}_n = W_{St}$, получаем зависимость для средней частоты выбросов в единицу времени

$$\mu = \frac{\bar{\mu} \sigma_t}{\sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_s^2}} \exp\left[-\frac{(W_d - \bar{W})^2}{2(\sigma_t^2 + \sigma_s^2)}\right]. \quad (25)$$

При совместном решении (25) и (4) получаем зависимость для расчета надежности объекта

$$P = \exp\left\{-\frac{\bar{W} - T_j}{\exp\left[\frac{(\sigma_t^2 + \sigma_s^2)}{2}\right]}\right\}, \quad (26)$$

где

$$j = \left(\frac{\sigma_t}{\sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_s^2}}\right).$$

Решение тех же уравнений относительно W_d дает зависимость для расчета допустимых (возможных) с вероятностью P максимальных и минимальных значений влажности на объекте

$$W_d^{\max} = \bar{W} + \sqrt{2(\sigma_t^2 + \sigma_s^2) \ln [T_j / \ln (1/P)]}, \quad (27)$$

$$W_d^{\min} = \bar{W} - \sqrt{2(\sigma_t^2 + \sigma_s^2) \ln [T_j / \ln (1/P)]}. \quad (28)$$

Таким образом, полученные зависимости позволяют рассчитать надежность работы мелиоративного объекта по показателям влажности почвы, а также определить с заданной вероятностью возможные допустимые значения максимальной и минимальной влажности. Расчеты могут выполняться для любого заданного срока T (вегетационного периода в целом или его части, ряда периодов вегетации, многолетия). Входящие в расчетные уравнения показатели определяются на основании статистических рядов наблюдений за влажностью почвы на диагностируемых мелиоративных объектах.

Пример расчета. В табл. 1 приведены фактические данные статистических наблюдений за влажностью почвы на мелиоративных объектах «Горивец» (Витебская опытно-мелиоративная станция), «Сутин» (колхоз «Сутинский» Пуховичского района Минской области), ПОМС (Полесская опытно-мелиоративная станция).

Требуется определить надежность работы объектов по показателям влажности почвы для отдельных лет и периода наблюдений в целом. Верхняя граница оптимальной влажности принята для зерновых культур равной 120 % НВ, что соответствует допустимой аэрации почвы, составляющей при этом не менее 25 % от общей порозности, нижняя граница – 60 % НВ.

После расчета по формулам (17) для объекта ПОМС и (26) для остальных объектов получаем характеристики надежной работы мелиоративной системы отдельно для верхнего и нижнего допустимых пределов оптимальной влажности. Учитывая, что оценки надежности по нижнему и верхнему пределу влажности почвы являются зависимыми, так как невозможно одновременное переувлажнение и переосушение почвы, в качестве общей надежности принимается минимальная [6]. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Результаты расчета показывают, что несмотря на вполне удовлетворительную характеристику надежности отдельных участков осушительной системы «Горивец» общая надежность системы на этом объекте за исследуемый период составляет всего 50 %. Следует отметить, что при оценке эффективности работы осушительных систем целесо-

Таблица 1. Статистические характеристики мелиоративных объектов

Год	Объект, номер участка	Тип мелиоративной системы	Средняя влажность за период W,%НВ	Стандартное отклонение во времени σ_t , % НВ	Стандартное отклонение по площади σ_s , % НВ	Средняя частота выбросов μ , сут ⁻¹ .
1993	Горивец-1	ОС	86,3	10,8	1,4	0,006
	Горивец-2	То же	81,9	11,8	2,5	0,006
	Горивец-3	«	75,9	14,5	3,6	0,006
	Горивец-4	«	73,1	16,7	4,6	0,006
1994	Горивец-5	«	66,2	19,9	3,9	0,006
	Горивец-6	«	72,8	20,2	5,2	0,006
	Горивец-7	«	79,5	23,8	5,6	0,006
	Горивец-8	«	82,6	24,9	6,0	0,006
1993-1994	Горивец	«	77,3	25,1	5,7	0,006
1996	Сутин	ОУС	72,1	12,0	9,5	0,007
1997	То же	То же	87,6	11,1	9,0	0,006
1999	«	«	71,3	13,5	4,8	0,008
1996-1999	«	«	79,0	14,3	9,5	0,007
1977-1980	ПОМС	ООС	93,8	6,81	-	0,011

Примечания. 1. Период вегетации для представленных объектов – 150 сут.

2. ОС – осушительная система, ОУС – осушительно-увлажнительная система, ООС – осушительно-оросительная система.

Таблица 2. Надежность работы мелиоративных объектов по показателям влажности почвы

Год, период	Объект, номер участка	Надежность работы Р, доли единицы		
		по нижнему пределу оптимальной влажности	по верхнему пределу оптимальной влажности	общая надежность
1993	Горивец-1	0,95	0,99	0,95
	Горивец-2	0,84	0,99	0,84
	Горивец-3	0,61	0,99	0,61
	Горивец-4	0,52	0,98	0,52
1994	Горивец-5	0,43	0,97	0,43
	Горивец-6	0,49	0,93	0,49
	Горивец-7	0,53	0,80	0,53
	Горивец-8	0,55	0,74	0,55
1993-1994	Горивец	0,50	0,80	0,50
1996	Сутин	0,44	0,99	0,44
1997	То же	0,72	0,95	0,72
1999	«	0,32	1,00	0,32
1996-1999	«	0,47	0,95	0,47
1977-1980	ПОМС	1,00	1,00	1,00

образно руководствоваться показателем надежности, рассчитанным на верхний допустимый предел оптимальной влажности, поскольку уменьшение влажности и переход ее за нижний допустимый уровень не зависит от работы системы и определяется только гидрометеорологическими, не регулируемые в данном случае факторами. При таком подходе вероятность безотказной работы исследованного объекта достигает 80 %.

Для осушительно-увлажнительной системы «Сутин» за период исследований обеспечивается меньшая общая надежность работы, составляющая 47 %. При работе в режиме осушения вероятность безотказной работы достигает 95 %. Отметим, что мно-

гие осушительно-увлажнительные системы, построенные несколько десятилетий назад, в настоящее время не обеспечивают требуемый водный режим на мелиорированных землях по причине физического износа, ухудшения с течением времени водно-физических свойств и морфометрических характеристик почвенного профиля, недостаточного уровня эксплуатационных мероприятий на системах, отсутствия гарантированных водоисточников для работы в режиме подпочвенного увлажнения.

Наиболее высокой надежностью работы, составляющей как для верхнего, так и для нижнего уровня оптимальной влажности почвы почти 100 %, характеризуется осушительно-оросительная система ПОМС. Понятно, что именно ООС могут обеспечить наиболее эффективное оперативное управление водным режимом.

Литература

1. Лихацевич А.П. Критерии оценки мелиорированных земель // Мелиорация переувлажненных земель: Сб. науч. тр. БелНИИМил. Т. XLVII. – 2000. – С. 5-9.
2. Капильевич Ж.А., Высоченко А.В., Брусиловский Ш.И. Применение методов гармонического анализа и корреляции случайных процессов к прогнозу влажности минеральных почв// Прогнозы водного режима при мелиорации земель: Сб. науч. работ БелНИИМлВХ. – 1988. – С. 103-109.
3. Циприс Д.Б., Ревут В.И. Орошение и мульчирование на северо-западе Европейской территории СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 144 с.
4. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
5. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. – М.: Наука, 1968. – 234 с.
6. Мирцхулава Ц.Е. Надежность гидромелиоративных сооружений. – М.: Колос, 1974. – 280 с.

Резюме

Предложен метод оценки мелиорированных земель по показателям влажности почвы, который вместе с другими принципами, определяющими эффективность мелиорации, может быть использован для обоснованного планирования допустимых объемов затрат на мелиорацию, выбора участков под реконструкцию или модернизацию мелиоративных систем, эксплуатационных, агро-мелиоративных и агротехнических мероприятий.

Ключевые слова: мелиорация, мелиоративные системы, водный режим, влажность почвы.

Summary

Kopytovskikh A. Method of evaluation of efficiency of reclamative system performance by a state of water regime on improved lands

The method of evaluation of reclaimed lands for parameters of soil humidity is offered. This, together with other principles defining efficiency of a land reclamation, can be utilized to reasonably plane allowable cost volumes for a land reclamation, choice of fields for up-dating or modernization of reclamative systems, operational, land-reclamation and agronomic measures.

Keywords: land reclamation, reclamative system, water regime, soil humidity.