

УДК 631.58:551.5

**УПРАВЛЕНИЕ КИСЛОТНОСТЬЮ ПОЧВ В СИСТЕМАХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ****И. М. Михайленко, В. Н. Тимошин***ГНУ Агрофизический научно-исследовательский институт Россельхозакадемии**Гражданский проспект, д. 14, Санкт-Петербург, 195220**E-mail: i.mikhailenko@yandex.ru**Поступила в редакцию 14 мая 2013 г., принята к печати 10 июня 2013 г.*

В работе на основании классической теории управления стохастическими динамическими системами поставлена и решена задача управления кислотностью почв в реальных севооборотах. Особенностью решения задачи является применение методологии и техники точного земледелия, что позволяет применять полученные результаты в практическом земледелии.

**Ключевые слова:** известкование почв, химические мелиоранты, математические модели потерь урожая, динамика показателей кислотности, средний риск, критерий оптимальности, стратегия внесения мелиоранта, управление.

**ВВЕДЕНИЕ**

Разработка и утверждение Правительством РФ Федеральной целевой программы «Мелиорация почв на период 2014–2020 гг.» предъявляет жесткие требования к практической отдаче современной мелиоративной науки. В наибольшей степени данные требования относятся к области химической мелиорации и, в частности, к решению проблемы снижения кислотности почв, так как площадь подкисленных почв в Российской Федерации уже превышает 50 млн. га, что эквивалентно потерям около 20 млн. тонн зерна.

Кислые почвы характерны для районов, где количество осадков достаточно высокое, например, для Нечерноземья и Подмосковья. Дождь и снег повышают количество влаги в почве, и концентрация кальция и магния в почвенном растворе снижается. Ионы кальция и магния переходят из почвенного поглощающего комплекса в почвенный раствор и в конечном итоге вымываются из почвы. Их место в почвенном поглощающем комплексе занимают ионы водорода  $H^+$ , почва подкисляется, требуется проведение ее известкования. В регионах, где количество осадков превышает 500 мм в год, ежегодные потери кальция из-за вымывания составляют примерно  $55 \text{ г м}^{-2}$ . Приблизительно такое же количество кальция выносится из почвы с урожаем. Чрезмерный высокий (выше 9) или низкий (ниже 4) уровень кислотности рН почвы токсичен для корней растений. В пределах данных значений рН определяет поведение отдельных питательных веществ, их осаждение или превращение в неусваиваемые растениями формы. Оптимальным

считается рН 6.5 – слабокислая реакция почвы.

Внесение кальция или кальциевомагневых соединений с целью снижения кислотности обычно называют известкованием. Хотя термин «известь» относится к  $CaO$  (негашеная известь), им называют и другие соединения кальция или кальция и магния. Известкование проводится с целью довести рН почвы до слабокислой (рН 6.5). Если же нужно повысить кислотность почвы, то помогут некоторые азотные удобрения, например, сернокислый аммоний, но наибольший эффект достигается при применении элементарной серы. Известкование решает две задачи: снижение кислотности почвы и удобрение почвы кальцием, а часто и магнием, например, при использовании доломитовой муки (Небольсин, Небольсина, 2010).

Количество мелиоранта, вносимого в почву, зависит от следующих условий:

– требуемого изменения рН – наиболее кислые почвы требуют больших доз внесения мелиоранта;

– поглотительной способности почвы (емкости катионного обмена) – илистые и глинистые почвы нуждаются во внесении более высоких доз, чем песчаные почвы, органическое вещество почв обладает высокой емкостью поглощения кальциевомагневых соединений, тяжелые глинистые почвы нуждаются в более частом известковании;

– количества осадков – дожди и талые воды вымывают кальций и магний из почвы;

– типа мелиоранта и размера его частиц.

Кроме того, следует иметь в виду, что передозировка мелиоранта препятствует нормальному росту растений, так как избыток извести затрудняет поглощение растениями других необходимых питательных элементов.

Таким образом, проблема определения оптимальных доз внесения мелиорантов, регулирующих кислотность почв, является достаточно сложной и актуальной. При этом важной особенностью процесса изменения кислотности почв является то, что он происходит значительно медленнее процесса вегетации и всех основных обменных процессов в почве. Поэтому дозы внесения мелиорантов могут оказывать воздействие на почву в течение нескольких лет, отражаясь на состоянии культур в фактических севооборотах. Другой особенностью данного процесса является наличие большой пространственной неоднородности физических свойств почв, приводящей к неоднородности показателя кислотности. Все перечисленное выше указывает на то, что затронутая проблема может быть успешно решена только на базе современной методологии и техники систем точного земледелия (ТЗ).

Проблема оптимизации доз внесения мелиорантов уже рассматривалась на страницах журнала (Якушев и др., 2012). Данная работа имеет научно-методическое значение и демонстрирует возможности статистиче-

$$Du_j(k, T) = (U_j(F) - u_j(k, T)) = p_{1j}(k^* - k(T)) + p_{2j}(k^* - k(T))^2 + x_j(T), \quad (1)$$

$$U_j(F) = B^T F,$$

где  $\Delta u(k, T)$  – величина снижения урожая в  $T$ -ом году по отношению к потенциальному уровню  $U(F)$  для вектора заданных условий (лимитирующих факторов)  $F$  и оптимального уровня кислотности  $k^* = 6.5$ ;  $B$  – вектор параметров модели потенциального урожая;  $k(T)$  – показатель кислотности почвы в  $T$ -ом году;  $u(k, T)$  – прогнозируемый урожай для  $T$ -го года;  $p_1, p_2$  – параметры модели;  $\xi(T)$  – ошибка моделирования, представляющая собой случайную величину с нулевым сред-

$$k(T+1) = ak(T) + bd(T) + cw(T) + z(T), \quad (2)$$

где  $d(T)$  – доза внесения мелиоранта на единицу площади в  $T$ -ом году;  $w(T)$  – среднемесячное количество осадков в  $T$ -ом году;  $a, b, c$  – параметры модели;  $\zeta(T)$  – ошибка моделирования, представляющая собой случай-

ских подходов к решению подобных задач. В то же время на основе работы трудно получить практические рекомендации по их использованию в системах ТЗ. В ней не отмечено, как влияет вносимый мелиорант на продуктивность различных культур в севооборотах, не учитывается пространственная неоднородность показателя кислотности и не обоснована общая стратегия внесения мелиорантов и настройки параметров машин системы ТЗ для их внесения в конкретное поле.

В настоящей работе все перечисленные аспекты рассмотрены в рамках теории оптимального управления стохастическими динамическими системами в сочетании с методологией и техникой точного земледелия.

### ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Гиперинерционность процесса изменения кислотности почв приводит к необходимости рассматривать его в годовом масштабе времени и тем самым выделять его из множества других более динамичных лимитирующих факторов урожая, обычно рассматриваемых в суточном масштабе времени. Учитывая, что кислотность является фактором, снижающим урожай, полученный для конкретных условий, то целесообразно рассматривать величину снижения урожая по сравнению с потенциальным уровнем для заданных условий и заданной  $j$ -й культуры:

ним и дисперсией  $d_{ii}$ ;  $t$  – индекс транспонирования векторов и матриц.

Полиномиальная модель снижения потерь урожая за счет роста кислотности почв (1) распространяется на заданную культуру и выбранную единицу площади,  $m^2$  или га.

Мы сможем прогнозировать потери по модели (1) лишь в том случае, когда будем располагать динамической моделью показателя кислотности:

ную величину с нулевым средним и дисперсией  $d_k$ .

Допустим, принятый  $N$ -летний севооборот включает в себя последовательность культур, обозначаемых индексами

$j = 1, 2, \dots, N$ . Тогда целью управления кислотностью почв на всем севообороте будет минимизация потерь урожая по всем культурам севооборота при минимально возмож-

ных затратах на внесение мелиоранта. Данной цели соответствует следующий критерий оптимальности:

$$I = M \left\{ e^{-\frac{g}{N}} \left[ (k^*(T) - k(t))^2 + c_u D u(k, T) + c_d d(T) \right] \right\} \underset{D_1}{s} \underset{J}{s} \underset{d}{s} \underset{J}{s} \underset{D_2}{s} \text{min}, \quad (3)$$

где  $M$  – математическое ожидание во временной области,  $c_u, c_d$  – цены на единицу урожая и единицу массы мелиоранта,  $D_1, D_2$  – ограничения на максимальную и минимальную величину дозы внесения в одном году,  $g$  – весовой множитель, являющийся дополнительным внутренним (алгоритмическим) фактором оптимизации и выбираемый в программе управления автоматически, исходя из максимизации чистого дохода от известкования.

Критерий (3) имеет смысл «минимизации потерь урожая от подкисления и среднеквадратического отклонения от оптимального уровня средней кислотности почв на всем севообороте за  $N$  лет», по своей сути он является «суммарным средним риском управления».

В соответствии с общепринятой теорией оптимального управления (Казakov, 1987), ведем в рассмотрение гамильтониан для модели (2) и критерия (3):

$$H = M [c_u D u_j(k, T) - c_d d(T)] + l(T+1) [ak(T-1) + bd(T) + cw(T)], \quad (4)$$

где  $l(T) = \frac{\partial H}{\partial k(T)}$ ,  $l(N) = 2(k^* - k(N))$  – сопряженная переменная системы и ее конечные значения для последней  $N$ -ой культуры севооборота.

Тогда оптимальная стратегия внесения доз мелиоранта по годам находится путем выполнения следующей последовательности операций:

$$d^*(T)_n = d^*(T)_{n-1} - d_n \frac{\partial H}{\partial d}(T)_n, \quad \text{если } D_1 < d^*(T)_n < D_2, \quad (5)$$

$$\text{если } d^*(T)_n \leq D_1, \text{ то } d^*(T)_n = 0, \text{ если } d^*(T)_n \geq D_2, \text{ то } d^*(T)_n = D_2,$$

где  $n$  – индекс последовательности операций. С учетом выражений для моделей (1), (2), (3) градиент гамильтониана (4) и модель

для сопряженной переменной имеют следующий вид:

$$\frac{\partial H(T)}{\partial d} = [2bg(k^*(T) - k(T))] + [bc_m(2p_2(k^* - k(T)) - p_1) + c_d] + b\lambda(T); \quad (6)$$

$$\lambda(\dot{0}) = \frac{\partial H(T)}{\partial k} = [2g(k^*(T+1) - k(T+1)) + c_m(p_2(k^*(T+1) - k(T+1)) - p_1) + a\lambda(T+1)], \quad (7)$$

$$l(N) = 0, \quad T \in (N, 1).$$

В соответствии со стратегией  $d^*(T)$  оптимальные дозы внесения на единицу площади в зависимости от вида культур и скорости нарастания показателя кислотности могут быть как максимально допустимыми  $D_1$ , так и нулевыми. Оптимальные стратегии уточняются по итогам очередного сельскохозяйственного года, чем обеспечивается адаптация к реальным условиям и уменьшение ошибок в определении оптимальных доз.

тами оптимальной стратегии, обеспечивающей минимум принятого критерия оптимальности. Однако пока не решен ряд таких важных проблем, как оценка параметров используемых математических моделей, существенно различающихся для разных видов почв, культур и мелиорантов; измерение кислотности в реальных условиях; учет пространственной неоднородности кислотности по площади поля.

Таким образом, мы в общем виде обосновали годовые нормы внесения мелиоранта по годам севооборота, являющиеся элемен-

тами оптимальной стратегии, обеспечивающей минимум принятого критерия оптимальности. Однако пока не решен ряд таких важных проблем, как оценка параметров используемых математических моделей, существенно различающихся для разных видов почв, культур и мелиорантов; измерение кислотности в реальных условиях; учет пространственной неоднородности кислотности по площади поля.

Так, годовой масштаб времени рассмотрения процесса обуславливает использование метода «off-line», когда в процессе уборки урожая культуры формируется карта урожайности по всей площади поля –  $u(x,y)$ . Анализ данной карты позволяет выделить большие однородные зоны  $\Omega_i(x,y)$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$  и малые области, существенно различающиеся между собой по урожайности  $z_j(x,y)$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$  (Якушев, Буре, 2007). В соответствии с методологией ТЗ, нам необходимо построить стратегии внесения мелиоранта для каждой большой однородной области, а в малых областях по отбираемым пробам почвы химическим путем оценить показатель кислотности в координатах отбора  $k_j(x,y)$ . По измерениям формируется массив идентификации  $\{z_j(x,y), k_j(x,y), j = 1, 2, \dots, J\}$ , по которому уточняются параметры модели (1).

Накопление из сезона в сезон информации о реальной кислотности  $k(T)$ , количестве выпавших осадков  $w(T)$  и фактически внесенном мелиоранте  $d(T)$  позволяет формировать массив идентификации  $\{k(T), d(T), w(T), T = 1, 2, 3, \dots\}$ , по которому оцениваются параметры модели (2).

Наличие модели (1) для конкретного поля и культуры позволяет решить обратную информационную задачу, а именно по реальным отклонениям урожая от потенциального уровня, получаемым по результатам обработки карты урожайности, получить оценки показателя кислотности почвы путем решения уравнения:

$$\Delta u_j(x,y) = p_{1j}(k^* - \hat{k}(x,y)) + p_{2j}(k^* - \hat{k}(x,y))^2. \quad (8)$$

Осреднение оценок кислотности  $\hat{k}(x,y)$  по площади всего поля дает исходную базу для расчета общей стратегии внесения мелиоранта  $d^*(T)$  (норматив внесения на единицу площади), а осреднение по площади больших однородных областей  $d_{\Omega_i}(T)$  дает исходную базу для расчета норм внесения по данным областям, сохраняя общий баланс внесения:

$$S * d^*(T) = \sum_1^I S_{w_i} * d_{w_i}(T), \quad (9)$$

где:  $S, S_i$  – общая площадь поля и площадь однородных зон.

Исходя из баланса (7) осуществляется и настройка машины для внесения мелиоранта в процессе ее движения по полю:

$$g(y,T) = \sum_{i=1}^M \frac{l_i}{L} d_{w_i}(T), \quad (10)$$

где  $g(y,T)$  – погонный расход мелиоранта на единицу длины хода машины;  $M$  – число однородных зон с разной нормой внесения, попадающих в область захвата машины;  $l_i$  – ширина однородной зоны в области захвата машины,  $L$  – общая ширина захвата машины.

При этом для расчета норм внесения по однородным областям используется один и тот же алгоритм (4)–(7) с той лишь разницей, что в критерии оптимальности подставляют оценки кислотности почв отдельно для каждой области.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для апробации предложенной теории управления кислотностью почв был принят пятипольный севооборот, включающий в себя следующую последовательность культур: 1 – пшеница яровая; 2 – картофель; 3 – многолетние травы; 4 – свекла столовая; 5 – рожь озимая.

Интервал управления выбран равным двум севооборотам. При этом в модели динамики показателя кислотности (2) осадки приняты равными средним многолетним значениям.

На рис. 1 представлены результаты идентификации математической модели потерь урожая от кислотности почв для многолетних трав. Аналогичные модели строятся для всех других культур севооборота и отличаются друг от друга своими параметрами и оптимальными значениями показателя кислотности, которому соответствует минимальная потеря урожая. На рис. 2 представлены результаты идентификации модели динамики показателя кислотности, которая была построена по ретроспективным данным мониторинга состояния почв.

На рис. 3 представлена оптимальная стратегия внесения мелиоранта для следующих исходных данных: цена мелиоранта 8000 руб.  $t^{-1}$  цены продукции севооборотов: картофель – 10 руб.  $кг^{-1}$ ; многолетние травы – 1.0 руб.  $кг^{-1}$ ; овощи (свекла) – 11 руб.  $кг^{-1}$ ; рожь озимая – 4.2 руб.  $кг^{-1}$ ; пшеница яровая – 5.5 руб.  $кг^{-1}$ .

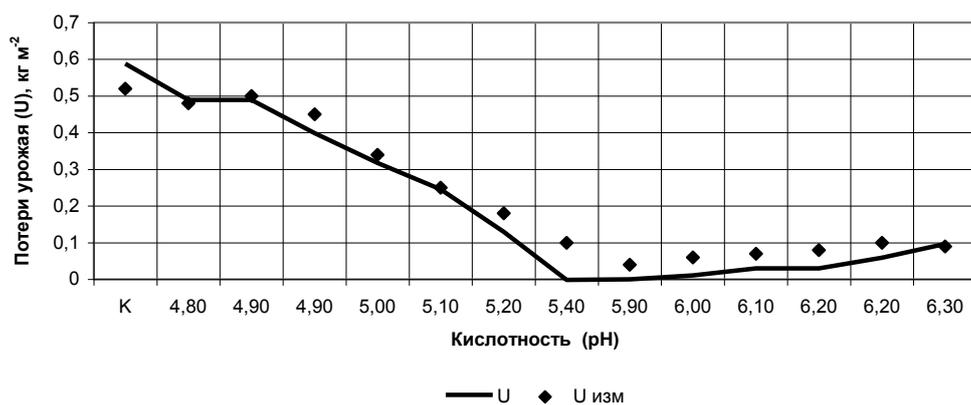


Рис. 1. Результаты идентификации модели потерь урожая U от показателя солевой кислотности K для многолетних трав

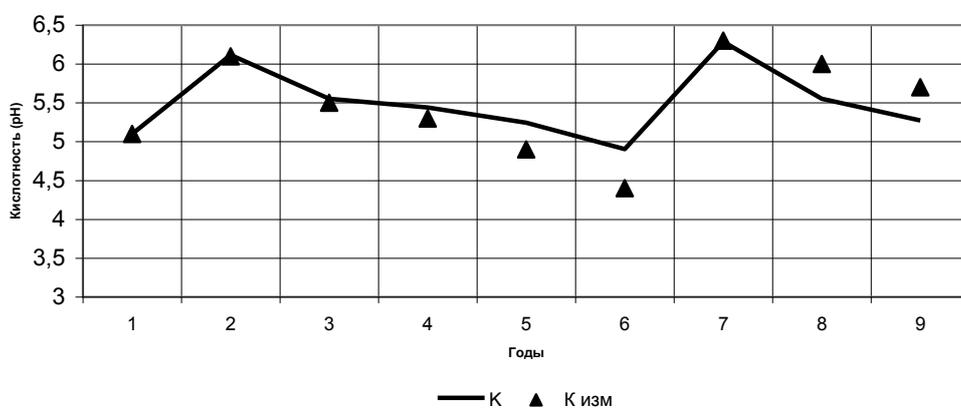


Рис. 2. Результаты идентификации модели динамики солевой кислотности почв по годам севооборота.

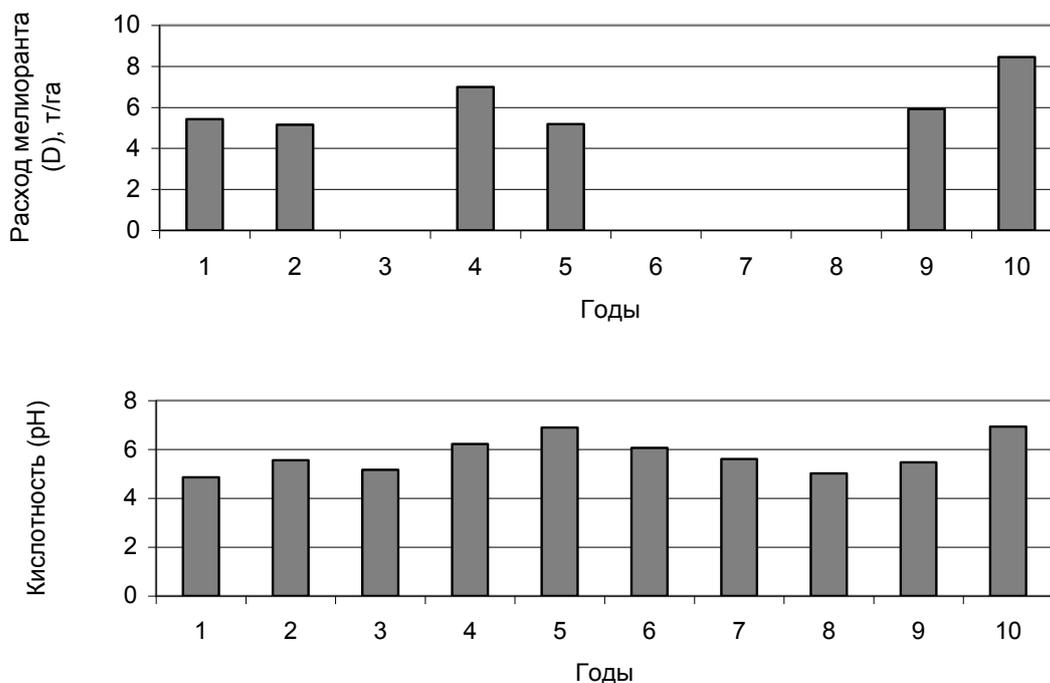


Рис. 3. Оптимальная стратегия внесения мелиоранта по годам севооборота и прогноз динамики солевой кислотности почв для ограничения на минимальную дозу 3 т га<sup>-1</sup> и начальное значение кислотности почвы 4.0. Значение критерия оптимальности I = 0.08, прибыль от известкования П = 23.2 руб. м<sup>-2</sup> в год

Кроме того, были получены оптимальные стратегии внесения для более низкого и более высокого начального значения показателя кислотности. При более низких значениях кислотности уменьшались дозы внесения в первые два года, и пропускался 4-й год, а при более высоких, наоборот, увеличивались дозы внесения в первые два и четвертый годы при незначительных изменениях доз в последние годы общего интервала управления.

Также исследовалось влияние ограничения на минимальную дозу внесения мелиоранта, когда при увеличении такого ограничения возникали дополнительные пропуски по отдельным годам, что приводило к большим отклонениям показателя кислотности от оптимальных значений по отдельным культурам севооборота (рис. 4). Уменьшение такого ограничения приводило к более дробным внесениям и уменьшению отклонений показателя кислотности от оптимальных значений для культур севооборота.

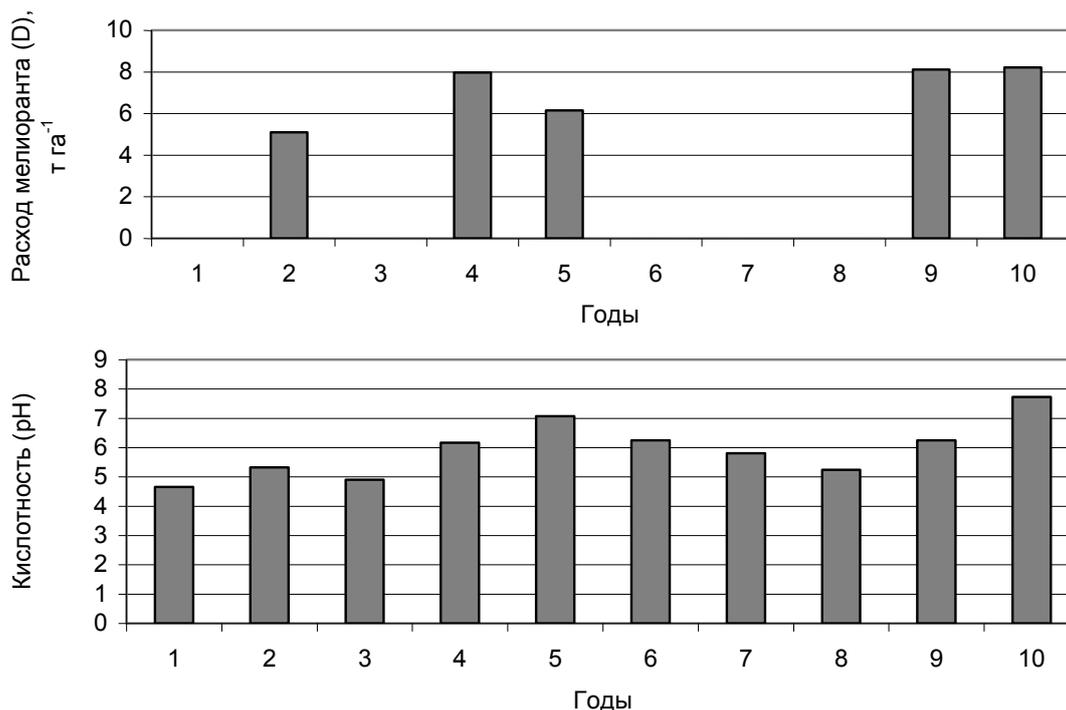


Рис. 4. Оптимальная стратегия внесения мелиоранта по годам севооборота и прогноз динамики солевой кислотности почв для ограничения на минимальную дозу  $5 \text{ т га}^{-1}$  и начальное значение кислотности почвы 5.0. Значение критерия оптимальности  $I = 0.11$ , прибыль от известкования  $\Pi = 23.0 \text{ руб. м}^{-2}$  в год

Установлено, что цена мелиоранта слабо влияет на параметры стратегии, но более рельефно отражается на чистом доходе от эффекта раскисления почвы.

Как было указано выше, в реальном времени из всей оптимальной стратегии реализуется только модель первого текущего года севооборота, в то время как по остальным годам это прогнозная информация, которая может использоваться для планирования заготовки нужных объемов мелиоранта и техники для его внесения. На рис. 5 представлены однородные участки поля, на которых указаны начальные значения показателей кислотности. Они получены на основе карты урожая многолетних трав путем

решения обратной информационной задачи (8).

По указанным начальным значениям были получены оптимальные стратегии внесения мелиоранта для каждой из зон. На рис. 6 показаны дозы внесения для первого года севооборота, которые должны быть реализованы в реальном времени. Такая реализация представлена на рис. 7, 8 при ширине захвата машины для внесения, равной половине (два прохода машины) и четверти ширины самого поля (четыре прохода машины). Здесь продемонстрировано, как должен изменяться расход мелиоранта при движении машины по полю, что является заданием для бортового компьютера, управляющего дозатором.

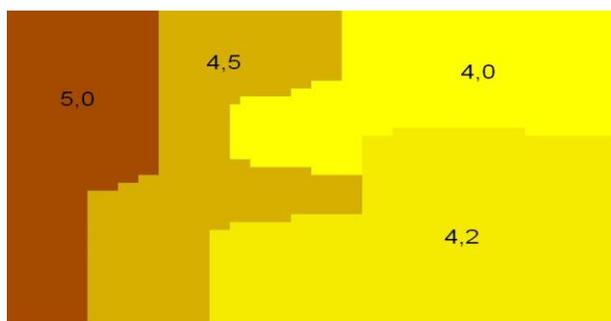


Рис. 5. Начальное значение показателя солевой кислотности (рН) в однородных зонах поля

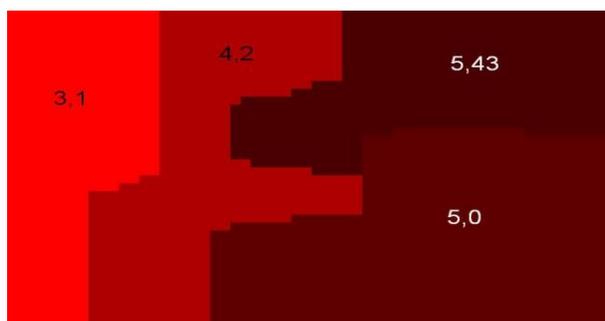


Рис. 6. Оптимальные дозы внесения мелиоранта по однородным зонам поля, т га<sup>-1</sup>

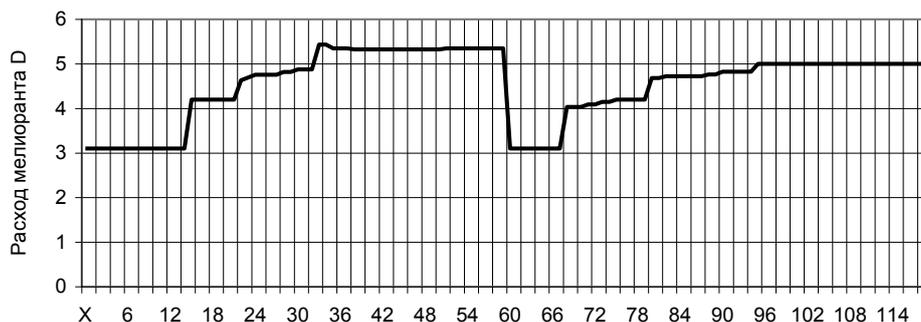


Рис. 7. График изменения расхода мелиоранта при движении машины для внесения мелиоранта по полю в два прохода, т га<sup>-1</sup>

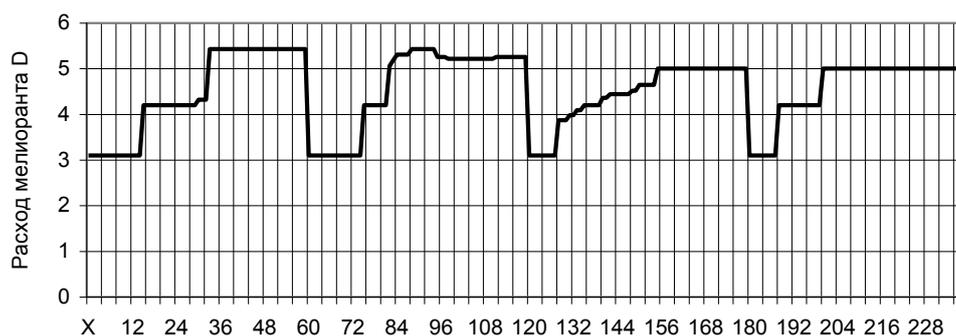


Рис. 8. График изменения расхода мелиоранта при движении машины для внесения мелиоранта по полю в четыре прохода, т га<sup>-1</sup>

## ВЫВОДЫ

Предложена теория управления кислотностью почв, включающая в себя общую постановку задачи, математические модели потерь урожая при отклонениях кислотности от оптимальных значений для отдельных культур севооборота, динамическую модель показателя кислотности и критерий оптимальности, представляющий собой средний риск потерь урожая и средств, затрачиваемых на известкование. На базе данной теории разработан программно-технический

комплекс, формирующий оптимальные стратегии внесения мелиоранта по годам севооборота, и алгоритм реализации внесения для первого года севооборота по однородным зонам сельскохозяйственного поля. Параметры оптимальных стратегий внесения мелиоранта в большей степени зависят от набора начальных значений показателя кислотности в однородных зонах и выбранных ограничений на минимальную и максимально допустимую дозы, в меньшей степени – от цены мелиоранта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Казаков И. Е. 1987. Методы оптимизации стохастических систем. М.: Наука.  
 Небольсин А. Н., Небольсина З. П. 2010. Известкование почв. СПб, РАСХН, ГНУ ЛенНИИСХ. 254 с.  
 Якушев В. П., Буре В. М., Якушев В. В., Буре А. В. 2012. Стохастическое моделирование и оптимальные решения при известковании почв. Агрофизика. 2: 24–28.  
 Якушев В. П., Буре В. М., Якушев В. В. 2007. Выделение однородных зон на поле по урожайности отдельных участков // Доклады РАСХН. 3: 33–36.