

**УПРАВЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ПОЧВ НА ОСНОВЕ
ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»

***Аннотация.** В статье представлены научно-методические основы задач оценивания и управления параметрами химического состояния почв на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В связи с недоступностью для ДЗЗ параметров химического состояния почвы, оценивание осуществляется в два этапа. На первом этапе оцениваются параметры состояния биомассы посева сельскохозяйственной культуры, а на втором этапе по этим оценкам строятся оценки параметров химического состояния почвы. Полученные оценки используются для управления параметрами химического состояния почвы в форме оптимальных стратегий внесения химических удобрений и мелиорантов в полевых севооборотах. Фундаментальной основой решаемой задачи являются математические модели оптических измерений (ДЗЗ), потенциального урожая и потерь урожая при отклонениях параметров химического состояния почвы от оптимальных значений для отдельных культур и динамических моделей самих параметров химического состояния почвы в годовом масштабе времени. Для формирования оптимальных стратегий внесения удобрений пролонгированного действия используется классическая теория управления динамическими системами, основанная на принципе максимума Понтрягина. Критерием оптимальности в рассматриваемой задаче является риск потерь урожая и перерасхода удобрений по всем годам используемого севооборота. Данный вид управления относится к стратегическому уровню, в силу пролонгированного действия удобрений и мелиорантов в течение пяти-семи лет. Данный уровень управления отсутствует в современных системах точного земледелия, что приводит к большим ошибкам в определении доз удобрений, мелиорантов и значительным потерям урожая и перерасходу дорогостоящих агрохимикатов.*

***Ключевые слова:** дистанционное зондирование, химическое состояние почвы, управление параметрами.*

Введение

В последние годы в АПК России явно проявляется тенденция роста объемов производства основных сельскохозяйственных культур, повышения их урожайности и рентабельности. Для дальнейшего повышения эффективности и развития потенциала отечественного сельского хозяйства необходима реализация возможностей современной цифровой экономики: внедрение новых информационных технологий и освоение инновационных решений. В то же время использование высоких технологий российскими аграриями является скорее исключением, чем правилом. Традиционно сельское хозяйство было одной из самых консервативных и инерционных отраслей в нашей стране. В настоящее время стало ясно, что использование цифровых технологий является уже не столько вопросом повышения конкурентоспособности, сколько условием выживания на рынке. Сегодня в АПК России информации по одним аспектам ведения хозяйства более чем достаточно, а по другим – крайне мало. Большие вопросы вызывает надежность и репрезентативность этой информации. Так при избытке информации об урожайности культур, не обладающей достаточной достоверностью, ощущается

острый дефицит информации по химическому составу почв. Без наличия такой информации невозможно эффективное управление в растениеводстве, где на ее основе требуется научное обоснование норм внесения минеральных удобрений.

В последнее время широкое распространение получила концепция «умного» сельского хозяйства», представляющего собой сочетание технологий в области анализа данных, в разработке сенсоров и самоуправляемой (беспилотной) техники, а также подключенных сетевых решений, систем управления, платформ и приложений, которые выводят агротехнологии на более высокий научно-технический уровень. При этом важным компонентом «умного сельского хозяйства» являются средства дистанционного сбора данных с полей, базирующихся на авиационных и спутниковых летательных аппаратах [1, 2]. Преимущества авиационных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для проведения аэрофотосъемки очевидны – они позволяют достичь разрешения до 1 см. Однако для больших хозяйств с десятками тысяч гектаров БПЛА уже не будут столь эффективны, и для этого оптимальным решением будет спутниковая съемка.

Среди компонентов «умного сельского хозяйства» центральное место занимают технологии точного земледелия (ТЗ), включающее в себя комплекс современных информационных технологий и роботизированных технологических машин [1, 3, 4]. По своей сути такой комплекс направлен на решение задач управления агротехнологиями. При этом основными технологическими операциями, посредством которых формируется урожай культур, является внесение минеральных удобрений. В тоже время оптимизация доз внесения удобрений пролонгированного действия в полевых севооборотах является одной из центральных и положительно не решенных до настоящего времени проблем. Она включает в себя две взаимосвязанные задачи, представляющие собой самостоятельные научно-технические проблемы. Первая из них заключается в оценивании параметров химического состояния почв на основе данных ДЗЗ, а вторая – в формировании стратегий внесения минеральных удобрений и мелиорантов по результатам их оценивания.

Материалы и методы исследований

Проблема оценивания параметров химического состояния почв, а именно, содержания основных элементов питания Р – фосфора, К – калия и кислотности рН почв, обусловлена тем, что современные средства ДЗЗ не чувствительны к этим параметрам, так как они распределены по всему объему верхнего слоя почвы. Вместе с тем информация о химическом состоянии почвы актуальна для управления севооборотами и принятия решений при внесении минеральных удобрений и мелиорантов. Выборочные обследования полей с отбором проб в отдельных точках, проводимых в конце периода вегетации, очень трудоемки и дороги, а самое главное не обладают достаточной точностью, требуемой для решения задач управления и принятия решений.

Ввиду того, что средствам ДЗЗ доступно только состояние биомассы посева, то для решения проблемы оценивания параметров химического состояния почвы предлагается двухэтапная процедура. Так на первом этапе по данным ДЗЗ оцениваются параметры состояния биомассы посева непосредственно перед уборкой урожая, а на втором этапе осуществляется оценивание параметров самого химического состояния почвы. Для оценивания параметров состояния биомассы посева используется математическая модель оптических измерений (дистанционного зондирования):

$$Z^T = P * W^T(X) \quad (1)$$

где: $Z^T = [z_1 \ z_2]$ – вектор средних по площади поля параметров отражения в видимом диапазоне (z_1) и в инфракрасном диапазоне (z_2); $P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \end{bmatrix}$ –

матрица параметров модели; $W^T(X) = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & x_1^3 \\ 1 & x_2 & x_2^2 & x_2^3 \end{bmatrix}$ – вектор-функция, где аргументами являются параметры состояния посева: x_1 – средняя по площади поля плотность биомассы посева (урожайность), кг/м²; x_2 – средняя по площади поля плотность сухой массы посева, кг/м².

Кроме модели ДЗЗ (1) нам еще потребуется модель потенциального урожая, на фоне которой мы будем формировать оценки потерь урожая при отклонениях параметров химического состояния от оптимальных значений:

$$U_j = B_j F, \quad (2)$$

где: $U_j^T = [u_{1j} \ u_{2j}]$ – вектор параметров потенциального урожая культуры, с компонентами: u_1 – средняя по площади поля плотность биомассы посева (урожайность), кг/м²; u_2 – средняя по площади поля плотность сухой массы посева, кг/м²; $B_j = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \end{bmatrix}_j$ – матрица параметров модели,

$F^T = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4]$ – вектор климатических условий возделывания культур с компонентами: f_1 – сезонная сумма температур; f_2 – сезонная сумма осадков; f_3 – суммарный приток ФАР; f_4 – годовой расход доступных форм азота, $j = 1, 2, 3, \dots, J$ – индексы культур севооборота.

Как уже отмечалось выше, алгоритм оценивания включает в себя два этапа, первый из которых заключается в оценивании параметров состояния посева по данным ДЗЗ, а второй – оценивание параметров химического состояния почвы по оценкам параметров состояния посева.

Этап 1. По данным ДЗЗ оценивается среднее значение вектора параметров биомассы по полю. Для этого необходимо решать обратную информационную задачу, когда по измеренным выходным переменным мы должны найти входные переменные. Ее решение соответствует следующей процедуре оптимизации:

$$\hat{X}_j = \arg \min_{\hat{X}_j} [Y_j - P^T W(\hat{X}_j)]^2, \quad (3)$$

где: Y_j – вектор реальных значений параметров отражения по используемым спектральным каналам системы ДЗЗ; \hat{X}_j – оценка вектора параметров биомассы посева.

Этап 2. Для реализации этого этапа вводятся параметры модели потенциального урожая (2), и формируется текущая величина потерь урожая:

$$\Delta u_j = B_j^T F - \hat{X}_j \quad (4)$$

Для реализации процедуры оценивания параметров химического состояния почвы необходимо введение математической модели, отражающей влияние параметров химического состояния почвы на конечный результат (урожай). Введем в рассмотрение вектор параметров химического состояния почвы заданного поля: $V = [3 \times 1]$, с компонентами: $v_1 = pH$, $v_2 = P$, $v_3 = K$, ; P – фосфор, K – калий. Примем допущение, что для каждой культуры севооборота известно оптимальное

содержание основных элементов питания и оптимальное значение показателя кислотности. Всякое отклонение от этих оптимальных значений приводит к потерям урожая [5-7]. С учетом того, что все вышеуказанные показатели химического состояния почвы действуют одновременно, то это может быть отражено в следующей линейно-квадратической форме модели потерь урожая в среднем по площади поля

$$\Delta U_j(T) = k_1^T (V_j^* - V(T)) + (V_j^* - V(T))^T K_{2j} (V_j^* - V(T)), \quad (5)$$

где: V^* – оптимальное значение вектора параметров химического состояния почвы на заданном поле; $\Delta U_j(T)$ – моделируемые потери урожая за счет отклонения вектора параметров химического состояния почвы от оптимального значения; $k_{1j}^T = [k_1 \ k_2 \ k_3]_j$ – матрица-строка параметров линейной части модели;

$$K_{2j} = \begin{bmatrix} k_4 & k_5 & k_6 \\ 0 & k_7 & k_8 \\ 0 & 0 & k_9 \end{bmatrix}_j \text{ – матрица параметров квадратичной части модели.}$$

Модель (5) целесообразно представить в линейной форме, более удобной для ее идентификации по экспериментальным данным:

$$\Delta U_j(T) = K_j^T Y_j, \quad (6)$$

$$K_j^T = [k_1 \ \dots \ k_{14}]_j,$$

$$Y_j^T = [(v_{1j}^* - v_1); \ (v_{2j}^* - v_2); \ (v_{3j}^* - v_3); \ (v_{4j}^* - v_4); \\ (v_{1j}^* - v_1)^2; \ (v_{1j}^* - v_1) \cdot (v_{2j}^* - v_2); \ (v_{1j}^* - v_1) \cdot (v_{3j}^* - v_3); \ (v_{1j}^* - v_1) \cdot (v_{4j}^* - v_4); \\ (v_{2j}^* - v_2)^2; \ (v_{2j}^* - v_2) \cdot (v_{3j}^* - v_3); \ (v_{2j}^* - v_2) \cdot (v_{4j}^* - v_4); \ (v_{3j}^* - v_3)^2; \\ (v_{3j}^* - v_3) \cdot (v_{4j}^* - v_4); \ (v_{4j}^* - v_4)^2]. \quad (7)$$

Оценка химического состояния почвы определяется путем решения следующей задачи оптимизации

$$\hat{V}(T, x, y) = \arg \min_{V(T, x, y)} [\Delta u_j(T, x, y) - k_1^T (V_j^*(T) - V(T, x, y)) + \\ + (V_j^*(T) - V(T, x, y))^T K_{2j} (V_j^*(T) - V(T, x, y))]. \quad (8)$$

Задачи оптимизации (3), (8) решаются с помощью современных градиентных схем поиска минимума дифференцируемых функций.

В рассматриваемой задаче реализуется стратегический уровень управления в ТЗ, так как факторами управления являются дозы минеральных удобрений и мелиорантов, действующих в полевых севооборотах в течение нескольких лет. В настоящее время такой уровень управления в системах ТЗ отсутствует, что приводит к большим ошибкам в управлении по отдельным периодам вегетации, так как химические параметры по годам севооборотов не согласованы между собой и являются существенными возмущениями друг для друга. Это приводит к существенным недоборам урожая и перерасходу дорогостоящих удобрений [3-6, 8]. Стратегический уровень управления является самым верхним во всей иерархии задач в системах ТЗ и здесь необходимо найти оптимальные стратегии внесения удобрений и мелиорантов, действующих несколько сельскохозяйственных сезонов.

Для решения этой задачи нам потребуются динамические модели всех параметров химического состояния почвы [5, 6, 11, 12]

$$\dot{v}_{1j} = a_{11}v_{1j}(T) + b_1d_{Ca}(T) + c_1f_2(T) \quad (9)$$

$$\dot{v}_{2j} = a_{22}v_{2j}(T) + b_1d_p(T) + c_2f_2(T) + d_2u_j(T) \quad (10)$$

$$\dot{v}_{3j} = a_{33}v_{3j}(T) + b_3d_K(T) + c_3f_2(T) + d_3u_j(T) \quad (11)$$

где: $u_j(T) = \mathbf{B}_j^T \mathbf{F}(T) - \Delta u_j(T)$ – урожай с учетом потерь для j -той культуры; $d_p(T)$, $d_K(T)$, $d_{Ca}(T)$ – дозы внесения элементов питания по годам севооборота (элементы стратегии), $a_{11}-a_{33}$, b_2-b_3 , c_1-c_3 – параметры модели, оцениваемые по экспериментальным данным.

Скалярная форма моделей (9)-(11) удобна для ее построчной идентификации, а для формирования оптимальной стратегии внесения агрохимикатов и мелиорантов необходимо перейти к канонической векторно-матричной форме, развернутой

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_1 \\ \dot{v}_2 \\ \dot{v}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(T) \\ v_2(T) \\ v_3(T) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 \\ 0 & 0 & b_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_p(T) \\ d_K(T) \\ d_C(T) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} f_2(T) + \begin{bmatrix} 0 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} u(T); \quad (12)$$

или компактной символьной форме

$$\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{AV}(T) + \mathbf{BD}(T) + \mathbf{c}f_2(T) + \mathbf{d}u(T) \quad (13)$$

Введенные ранее обозначения и модели позволяют нам сформировать критерий оптимальности решения задачи, адекватный поставленной цели

$$I = M \left\{ \int_{T=1}^N [(\mathbf{V}^* - \mathbf{V}(T))^T \mathbf{G}(\mathbf{V}^* - \mathbf{V}(T)) + c_{ju} \Delta u_j(T) + \mathbf{C}_d^T \mathbf{D}(T)] \delta T \right\}, \quad (14)$$

где: M – операция математического ожидания по площади поля, c_{ij} – цена единицы урожая j -й культуры, \mathbf{C}_d^T – вектор цен на минеральные удобрения по каждому элементу питания.

Критерий (14) имеет смысл среднего риска потерь урожая в севообороте, перерасхода ресурсов и суммарного отклонения вектора параметров химического состояния от оптимальных значений для культур севооборота.

Центральной проблемой формирования оптимальной стратегии внесения агрохимикатов является наличие пространственной неоднородности параметров химического состояния почвы на поле, при этом картины распределения отдельных элементов питания и кислотности всегда не совпадают, как между собой, так и с картиной распределения урожайности. Мы принимаем в качестве доминанты пространственное распределение показателя кислотности рН, так как этот параметр химического состояния является лимитирующим и снижает урожай даже при наличии оптимального содержания всех элементов минерального питания [7]. При таком подходе мы выделяем на карте показателя кислотности однородные зоны с близкими по значению показателями рН, и в границах этих областей все остальные параметры химического состояния усредняем [9, 13]. Тогда в начале каждого нового года севооборота мы располагаем набором векторов начальных условий для формирования стратегий внесения отдельно для каждой зоны, обозначаемой индексом $i = 1, 2, \dots, I$.

Введем в рассмотрение гамильтониан для модели (13), и критерия (14) для i -й зоны поля [6, 10]:

$$H_i(T) = [(V^* - V_i(T))^T G(V^* - V_i(T)) + c_u [K^T (V^* - V_i(T)) + (V^* - V_i(T))^T H(V^* - V_i(T))] + C_d^T D_i(T)] + \lambda^T [AV_i(T) + BD_i(T) + cw(T) + du(t)], \quad (15)$$

где λ – вектор сопряженных переменных, связанных с вектором химического состояния следующим образом:

$$\dot{\lambda}_i = \frac{\partial H_i(T)}{\partial V_i} = [G + H](V^* - V_i(T) + c_u K + A^T \lambda_i(T), \\ T \in (N, 0), \lambda_i(N) = 0. \quad (16)$$

Частная производная гамильтониана по вектору доз агрохимикатов

$$g_i(T) = \frac{\partial H_i(T)}{\partial D_i} = C_d + B^T \lambda_i(T). \quad (17)$$

Оптимальная стратегия внесения агрохимикатов находится путем выполнения следующей вычислительной процедуры:

$$D_{n,j}^*(T) = D_{n-1,j}^*(T) - \Delta_n [C_d + B^T \lambda_{n,i}(T)], D_1 \leq D_n^*(T) < D_2, \\ \text{если } D_{n,i}^*(T) < D_1, \text{ то } D_{n,i}^*(T) = 0, \quad (18) \\ \text{если } D_{n,i}^*(T) > D_2, \text{ то } D_{n,i}^*(T) = D_2,$$

где $n = 1, 2, \dots$ – шагов вычислительной процедуры, D_1, D_2 – нижнее и верхнее ограничения на дозу внесения агрохимиката.

В результате выполнения процедуры (18) мы располагаем I локальными стратегиями внесения агрохимикатов по всем однородным зонам показателя кислотности. Для получения общей стратегии, необходимой для планирования запаса агрохимикатов необходимо выполнить взвешенное усреднение локальных стратегий

$$D^*(T) = \frac{\sum_{i=1}^I S_i D_i^*(T)}{\sum_{i=1}^I S_i}, \quad (19)$$

где S_i – площади однородных зон показателя кислотности почвы.

Результаты и их обсуждение

Обсуждение результатов удобнее вести по каждому шагу всего алгоритма управления, включая процедуры оценивания параметров химического состояния почвы и формирования стратегии внесения удобрений.

Исходным шагом всей процедуры оценивания и управления параметрами химического состояния почв является получение данных ДЗЗ непосредственно после уборки урожая. На рисунках 1, 2 представлены фрагменты этих данных на поле с посевом многолетних трав в видимом (380-780 нм) и инфракрасном диапазоне оптического спектра (790-950 нм), где в окнах указаны параметры отражения в %.

Эти данные являются информационной базой для реализации алгоритма оценивания параметров химического состояния почвы (3), (8). На первом этапе этого алгоритма оценивается биомасса посева (рисунок 3), а на втором этапе – оцениваются параметры химического состояния почвы (рисунок 4, 5, 6).



Рисунок 1 – Фрагмент данных ДЗЗ посева многолетних трав в видимом диапазоне спектра (псевдоцвет)



Рисунок 2 – Фрагмент данных ДЗЗ посева многолетних трав в инфракрасном диапазоне спектра



Рисунок 3 – Локальные оценки величины плотности биомассы (урожайности) многолетних трав

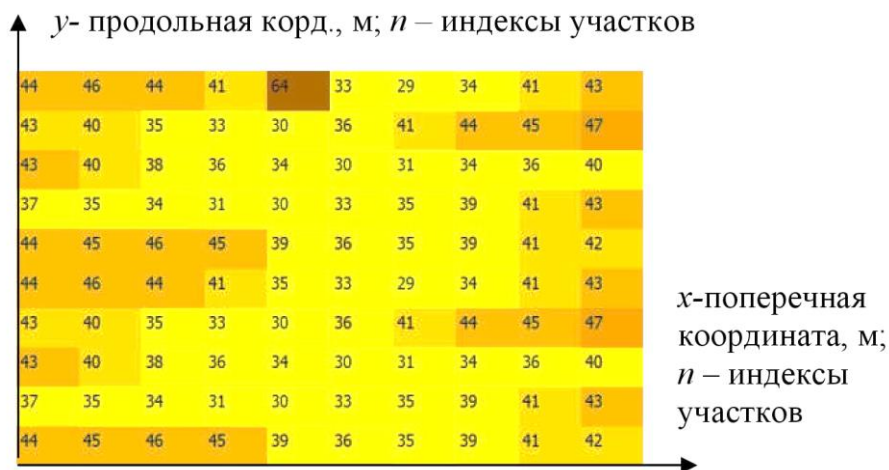


Рисунок 4 – Оценки содержания калия К в почве, кг/га

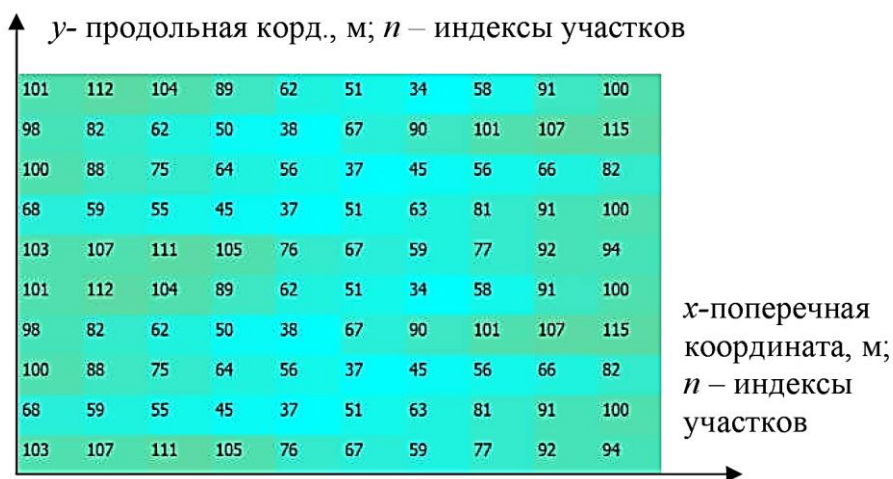


Рисунок 5 – Оценки содержания фосфора Р в почве, кг/га

Апробацию разработанной теории управления проводили на пятипольном севообороте, включающим в себя следующую последовательность культур: 1 – пшеница яровая; 2 – многолетние травы; 3 – картофель; 4 – свекла столовая; 5 – рожь озимая. Интервал управления составлял пять лет, то есть был равен одному севообороту. Исследования проводили в течение 2010-2016 гг. на полях Меньковского филиала Агрофизического филиала, где имеется биополигон с различными по составу культур севооборотами. Дополнительные эксперименты в 2015-2017 гг. по получению данных ДЗЗ по отдельным культурам севооборота проводились на полях ОАО «Приневское» Всеволожского района Ленинградской области. Для этого использовались беспилотный квадрокоптер «Геоскан – 400» с двухканальной камерой «Canon» и мобильный гиперспектрометр фирмы «Spectral Evolution RS-35» (США) с рабочим оптическим диапазоном 340-1250 нм. Для формирования оптимальных стратегий внесения агрохимикатов по оценкам показателя кислотности (см. рисунок 4) формируют однородные зоны, пример которых представлен на рисунке 6. Для каждой из этих зон формируются оптимальные стратегии доз внесения агрохимикатов, одна из которых представлена на рисунке 7. Здесь стратегии сформированы для начальных значений содержания элементов питания: калия (К) – 10 кг/га, фосфора (Р) – 15 кг/га.

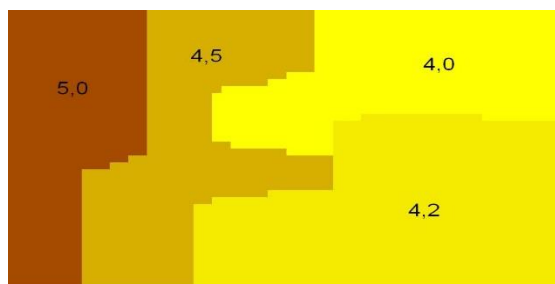


Рисунок 6 – Начальное значение показателя кислотности в однородных зонах поля

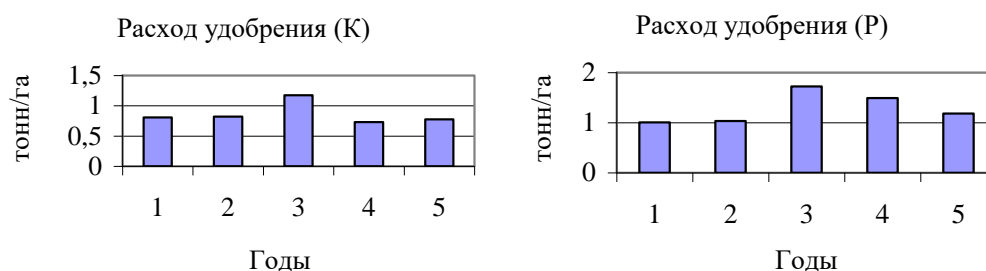


Рисунок 7 – Оптимальная стратегия калийных и фосфорных удобрений по годам севооборота для однородной зоны со значением показателя кислотности рН = 4,2

Из указанных стратегий в реальном времени реализуются только дозы внесения на очередной сельскохозяйственный сезон. Остальная информация используется при планировании объемов закупок удобрений и мелиорантов. Рассматриваемая задача управления применима для любых севооборотов и региональных условий. При этом все региональные особенности культур и почв учитываются параметрами используемых математических моделей, которые уточняются в процессе вегетации по реальным данным систем мониторинга состояния посевов и почв.

Выводы

Разработка научно-методических основ и программно-математического обеспечения задач оценивания и управления параметрами химического состояния почв не только дает в руки агронома высокопроизводительное средство контроля и принятия управленческих решений, но и существенно повышает экономическую отдачу современных авиационных и космических средств дистанционного зондирования Земли. В рамках новой концепции «умного» сельского хозяйства появляется возможность эффективного управления агротехнологиями на больших площадях, что позволяет расширить инструментарий современного точного земледелия за счет ввода в его управляющую структуру уровня стратегического управления. Апробация программно-математического обеспечения задач оценивания и управления по экспериментальным данным подтверждает их работоспособность. После реализации стадии ОКР появится возможность выпустить на рынок информационных продуктов и услуг инновационный продукт, пользующийся высоким спросом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ по проекту № 18-016-00008.

Литература

1. Jones D., Barnes E.M. Fuzzy composite programming to combine remote sensing and crop models for decision support in precision crop management // *Agricultural Systems*. 2000. No. 65 (3). P. 137–158.
2. Steven M.D. Satellite remote sensing for agricultural management: Opportunities and logistic constraints // *ISPRS Journal of Photogrammetric and Remote Sensing*. 1993. No. 48. P. 29–34.
3. Михайленко И.М. Управление системами точного земледелия. СПб.: СПбГУ, 2005. 233 с.
4. Точное сельское хозяйство (Precision Agriculture). Под ред. Шпаара Д., Захаренко А.В., Якушева В.П. . СПб.: ВИЗР, 2009. 397 с.
5. Михайленко И.М. Стратегический уровень управления в системах точного земледелия // *Агрофизика*. 2015. № 3. С. 25–34.
6. Михайленко И.М., Тимошин В.Н. Оптимизация химическими параметрами почв в полевых севооборотах // *Агрохимия*. 2016. № 3. С. 3–10.
7. Небольсин А. Н., Небольсина З. П. Известкование почв. СПб.: РАСХН, ГНУ ЛенНИИКСХ, 2010. 254 с.
8. Derby N.E., Casey F.X.M., Franzen D.E. Comparison of nitrogen management zone delineation methods for corn grain yield // *Agronomy Journal*. 2007. No. 99. P. 405–414.
9. Михайленко И.М., Тимошин В.Н. Управление кислотностью почв в системах точного земледелия // *Агрофизика*. 2013. № 2. С. 58–65.
10. Казаков И.Е. Методы оптимизации стохастических систем. М.: Наука, 1987. 354 с.
11. Roudier P., Tisseyre B., Poilve H., Roger J.-M. A technical opportunity index adapted to zone-specific management // *Precision Agriculture*. 2011. Vol. 12. P. 130–145.
12. Sun W., Whelan B., McBratney A., Minasny B. An integrated framework for software to provide yield data cleaning and estimation of an opportunity index for site-specific crop management // *Precision Agriculture*. 2013. Vol. 14. P. 376–391.
13. Якушев В.П., Буре В.М., Якушев В.В. Выделение однородных зон на поле по урожайности отдельных участков // *Доклады РАСХН*. 2007. № 3. С. 33–36.

References

1. Jones D., Barnes E.M. Fuzzy composite programming to combine remote sensing and crop models for decision support in precision crop management // *Agricultural Systems*, 2000. No. 65 (3), P. 137–158.
2. Steven M.D. Satellite remote sensing for agricultural management: Opportunities and logistic constraints // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1993. No. 48. P. 29–34.
3. Mikhaylenko I.M. Management of precision farming systems. St. Petersburg: St. Petersburg State University, 2005. 233 p.
4. Precision Agriculture. Ed. by Shpaar D., Zakharenko A.V., Yakushev V.P. St. Petersburg: All-Russian Institute of Plant Protection, 2009. 397 p.
5. Mikhaylenko I.M. Strategic level of management in the systems of precise agriculture // *Agrophysica*. 2015. No. 3. P. 25–34.
6. Mikhaylenko I.M., Timoshin V.N. The optimization of chemical parameters of soils in field crop rotations // *Agrocultural chemistry*. 2016. No. 3. P. 3–10.
7. Nebolsin A.N., Nebolsina Z.P. Liming of soils. St. Petersburg: Russian Academy of Agricultural Sciences, Leningrad Research Institute of Agriculture. 2010. 254 p.
8. Derby N.E., Casey F.X.M., Franzen D.E. Comparison of nitrogen management zone delineation methods for corn grain yield // *Agronomy Journal*. 2007. No. 99. P. 405–414.
9. Mikhaylenko I.M., Timoshin V.N. Soil acidity management in precision agriculture systems // *Agrophysica*. 2013. No. 2. P. 58–65.
10. Kazakov I.E. Methods of optimization of stochastic systems. Moscow: Nauka, 1987. 354 p.
11. Roudier P., Tisseyre B., Poilve H., Roger J.-M. A technical opportunity index adapted to zone-specific management // *Precision Agriculture*. 2011. Vol. 12. P. 130–145.
12. Sun W., Whelan B., McBratney A., Minasny B. An integrated framework for software to provide yield data cleaning and estimation of an opportunity index for site-specific crop management // *Precision Agriculture*. 2013. Vol. 14. P. 376–391.
13. Yakushev V.P., Bure V.M., Yakushev V.V. Isolation of homogeneous zones on the field according to yield of individual sites // *Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences*. 2007. No. 3. P. 33–36.

UDC 631.58:551.5

Mikhaylenko I.M., Timoshin V.N.

CONTROL OF THE CHEMICAL STATE OF SOILS BASED ON REMOTE SENSING DATA FROM THE EARTH

***Summary.** The article presents the scientific and methodological foundations of the tasks of assessing and controlling the parameters of the chemical state of soils on the basis of remote sensing data (RS). Since parameters of the chemical state of the soil are not available for RS, the procedure of evaluation involves two stages. During the first stage, the parameters of crop biomass state are assessed, and in the second stage, the assessment of the chemical state of the soil is made according to the parameters obtained from the first stage. These estimates are used to control the parameters of the chemical state of the soil in the form of optimal strategies for introducing chemical fertilizers and ameliorants in field crop rotations. Mathematical models of optical measurements (RS), potential yield and crop losses when the soil chemical state parameters deviate from the optimal values for individual crops and dynamic models of the parameters of the chemical state of soil on an annual time scale are the fundamental basis of the assigned task. Classical control theory of dynamical systems based on the Pontryagin's maximum principle is used for the formation optimal strategies for introducing slow release fertilizer compounds. The optimality criterion of the problem under review is the risk of crop losses and fertilizer overspending for all the years of crop rotation. This type of control refers to the strategic level, due to the prolonged effect of fertilizers and ameliorants for a period of five to seven years. This level of control is absent in modern precision agriculture, which leads to large errors in determining doses of fertilizers, ameliorants and significant crop losses and overspending expensive agrochemicals.*

***Keywords:** remote sensing, chemical state of soil, parameter management.*

Михайленко Илья Михайлович, доктор технических наук, главный научный сотрудник ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»; 195220, Россия, Санкт-Петербург, Гражданский проспект, 14; e-mail: ilya.mihailenko@yandex.ru.

Тимошин Валерий Николаевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»; 195220, Россия, Санкт-Петербург, Гражданский проспект, 14; e-mail: v.timoshin@yandex.ru.

Mikhaylenko Ilya Mikhaylovich, Dr. Sc. (Tech.), chief research scientist of FSBSI "Agrophysical Research Institute"; 14, Grazhdancky pr., St. Petersburg, 195220, Russia; e-mail: ilya.mihailenko@yandex.ru.

Timoshin Valeriy Nikolaevich, Cand. Sc. (Tech.), leading research scientist of FSBSI "Agrophysical Research Institute"; 14, Grazhdancky prospect, St. Petersburg, 195220, Russia; e-mail: v.timoshin@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию – 06.04.2018.

Дата принятия к печати – 11.04.2018.