

## Управление состоянием агроценоза на основе данных дистанционного зондирования Земли

И. М. Михайленко, В. Н. Тимошин

*Агрофизический научно-исследовательский институт  
Санкт-Петербург, 195220, Россия  
E-mails: ilya.mihailenko@yandex.ru, v.timoshin@yandex.ru*

Цель настоящей работы заключается в представлении новых результатов использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в задаче управления агротехнологией в реальном времени. Основной причиной низкой эффективности современных технологий точного земледелия стало отсутствие адекватной теории управления агротехнологиями. При этом при создании такой теории должен учитываться тот факт, что объект управления, которым выступает агротехнология, включает в себя агроценоз, в котором кроме посева культуры содержатся и сорные растения. Неучёт этого фактора приводит к ухудшению эффективности управления, снижению продуктивности посева и перерасходу минеральных удобрений и гербицидов. В настоящей работе впервые представлена полная теория управления состоянием агроценоза. Эта теория позволяет получать заданный урожай с требуемой надёжностью. Такое управление формируется на основе оценок параметров состояния посева культуры и сорных растений, формируемых по данным ДЗЗ в реальном времени. В основе представленной теории лежат новые математические модели параметров состояния сельскохозяйственных культур, почвенной среды, сорных растений, а также модели связи этих параметров с данными ДЗЗ. Факторами управления в агротехнологии представляются минеральные удобрения, гербициды и орошение. Естественно, параметрами технологических операций выступают дозы вносимых минеральных удобрений и гербицидов, а также нормы орошения. Эти операции проводят при наступлении определённых фенологических фаз посева сельскохозяйственных культур. Данные дистанционного зондирования вводятся именно в такие моменты времени, когда на их основе оцениваются параметры состояния посевов и сорных растений. Представленная теория основана на классических принципах управления, используемых в современных динамических системах. Согласно предложенной теории был разработан специализированный программный комплекс, с помощью которого система управления была апробирована на примере посева яровой пшеницы.

**Ключевые слова:** агротехнологии, агроценоз, параметры состояния, посев культуры, сорные растения, оценивание параметров, управление, реальное время

Одобрена к печати: 01.06.2023  
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-71-84

### Введение

Основное ядро современных систем точного земледелия (ТЗ) — задачи управления агротехнологиями. Именно при реализации этих задач возможно получение высокой экономической отдачи от всего технологического комплекса ТЗ. В то же время успешная реализация этих задач сдерживается отсутствием развитой теоретической базы. В настоящее время в работах современных исследователей рассматривались только отдельные аспекты проблемы управления. Это относится к выбору математических моделей посевов и почв (Jouven et al., 2006; Thompson, Krogh, 2007), управления отдельными режимными параметрами (Derby et al., 2007), развитию зонального подхода к внесению минеральных удобрений и обработок гербицидами (Roudier et al. 2011; Tisseyre, McBratney, 2008). Отдельно рассматривались проблемы рисков, связанных с аспектами управления агротехнологиями (Heatherly, Elmore, 2004; Kim, Chavas, 2003).

Существенным сдерживающим фактором создания и развития общей теории управления являются незначительные достижения в области использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для формирования оценок количественных параметров посевов и почвенной среды. Без наличия таких оценок невозможно реализовать управление агротехнологиями. Интерпретация информационного содержания спектральных характеристик растительности продолжает оставаться предметом многочисленных научных исследований, однако

существенных результатов в области оценивания количественных показателей пока не получено (Марчуков, 2011; Strippen, 1990; Gamon et al., 1997; Sami et al., 2020). Получившие наиболее широкое распространение спутниковые системы ДЗЗ, предназначенные для удовлетворения многих потребностей в мониторинге и управлении сельским хозяйством, ещё не способны предоставить информацию для принятия управляющих решений (Антонов, Свит, 2009; Барталев и др., 2006; Datt, 1999; Sanderson, 2001; Sims, Gamon, 2002; Steven, 1993). Появление первых работ по оцениванию параметров биомассы посевов сельскохозяйственных культур и почвенной среды послужило существенным стимулом для развития общей теории управления агротехнологиями (Михайленко, Тимошин, 2018, 2020, 2021; Mikhailenko, 2013a, 2022).

Отправным пунктом создания такой теории стала разработка общей концепции управления агротехнологиями (Михайленко, 2017). В соответствии с этой концепцией общее управление агротехнологией организовано в три уровня. На первом уровне, рассматриваемом в годовом масштабе времени, реализуется стратегическое управление, или управление севооборотом. Результатами управления на данном уровне представляются оптимальные стратегии внесения минеральных удобрений пролонгированного действия по годам севооборота. На втором уровне, рассматриваемом в суточном масштабе времени, реализуется управление состоянием одной культуры в течение одного вегетационного периода. Результатами управления на данном уровне выступают оптимальные программы управления, представляющие последовательности технологических операций, выполняемых при наступлении заданных фенологических фаз. Управление в реальном времени представляет собой третий, самый нижний уровень управления.

Первые два уровня являются планирующими и реализуются предварительно, вне реального времени. Если первый, стратегический, уровень может использоваться агрономической службой для подготовки ресурсов управления агротехнологиями, то второй, программный, становится задающим по отношению к управлению в реальном времени. На этом уровне формируется оптимальная программа, которая должна воспроизводиться в реальном объекте управления (ОУ). Поэтому основной эффект от оптимизации управления агротехнологией проявляется в реальном времени, когда формируются технологические операции по фактическому состоянию посева. Именно здесь показывается максимальная эффективность использования данных ДЗЗ, без которых невозможно оценивание текущего состояния ОУ и выработка оптимальных управлений (Mikhailenko, 2013b; Mikhailenko, Timoshin, 2020).

В то же время в первоначальном варианте теории в качестве ОУ рассматривались агротехнологии только с посевом сельскохозяйственной культуры, без учёта того, что в составе агроценоза на том же поле содержатся сорные растения. Вносимые удобрения стимулируют рост не только посева основной культуры, но и сорных растений, а обработки гербицидами подавляют рост и сорных растений, и растений культуры. В связи с этим в последние годы появились работы по технологиям совместного внесения минеральных удобрений и обработок гербицидами (Емельянов и др., 2013; Корсаков и др., 2013; Немченко и др., 2006). Такие исследования стали стимулом для дальнейшего развития общей теории управления агротехнологиями (Михайленко, Тимошин, 2022).

Цель настоящей работы состоит в дальнейшем развитии общей теории управления агротехнологией с использованием данных ДЗЗ в реальном времени. Это развитие относится к задаче управления состоянием агроценоза, в составе которого содержатся посев основной культуры и сорные растения. Для апробации предложенной теории рассматривается посев яровой пшеницы. С учётом множества фенофаз развития яровой пшеницы такой агроценоз представляет собой ОУ большой размерности с переменной структурой.

## Материалы и методы

### *Математические модели объекта управления*

Исходный пункт решения любой задачи управления — выбор достижимой цели. Когда мы имеем дело с агротехнологией, то такой целью может быть только получение заданного урожая культуры в конце вегетационного периода. Любая задача управления базируется на матема-

тическом описании ОУ. В рассматриваемом случае им представляется сельскохозяйственное поле с агроценозом, в составе которого присутствует посев яровой пшеницы и сорные растения. Фундаментальной основой для решения задачи управления выступают математические модели, описывающие динамику параметров состояния ОУ. При этом кроме наличия математической модели основной культуры ОУ должен дополняться моделью сорных растений. Необходимо, чтобы такие модели отражали влияние на параметры ОУ управляемых воздействий, внешних неуправляемых возмущений, а также учитывали взаимосвязь параметров ОУ между собой через почвенную среду.

Для достижения вышеуказанной цели управления требуется выбрать наиболее важные целеобразующие параметры состояния посева возделываемой культуры. По таким параметрам строится критерий оптимизации, минимизация которого позволяет формировать управления, обеспечивающие достижения цели управления. При этом рассматриваемая культура в составе агроценоза характеризуется как континуальными параметрами состояния, к которым могут быть отнесены параметры состояния биомассы самого посева и почвенной среды, так и неколичественными (структурными) состояниями, к которым относятся фенологические фазы развития растений культуры (фенофазы). В качестве примера применения теории здесь рассматривается агроценоз с посевом яровой пшеницы. Для этой культуры в зависимости от принадлежности к интервалам времени  $t$  (сут) неколичественными состояниями  $s$  являются: при  $t \in (0-7)$  —  $s = 1$ , фаза посева; при  $t \in (11-13)$  —  $s = 2$ , фаза всходов (1-3-й листы); при  $t \in (21-29)$  —  $s = 3$ , фаза кушения; при  $t = 30$  —  $s = 4$ , фаза выхода в трубку; при  $t \in (31-32)$  —  $s = 5$ , фаза междоузлия; при  $t = 37$  —  $s = 6$ , фаза флагового листа; при  $t = 39$  —  $s = 7$ , фаза язычка; при  $t = 49$  —  $s = 8$ , фаза открытия листовой пазухи; при  $t \in (51-59)$  —  $s = 9$ , фаза колошения; при  $t \in (61-69)$  —  $s = 10$ , фаза цветения; при  $t \in (71-75)$  —  $s = 11$ , фаза молочной спелости; при  $t \in (85-86)$  —  $s = 12$ , фаза восковой спелости при  $t \geq 86$  —  $s = 13$ , фаза полной спелости.

Весь период вегетации в зависимости от структуры биомассы посева необходимо разделить на два временных интервала: с момента наступления 2-й фенофазы по момент наступления 9-й фенофазы и с момента наступления 9-й фенофазы по момент наступления 13-й фенофазы. На первом интервале параметрами биомассы посева становится общая и сырая масса, а на втором интервале к ним добавляется масса колосьев, большая часть которой представляет собой урожай зерна. В то же время внесение удобрений, обработка гербицидами и полив проводятся в фиксированные моменты времени наступления следующих заранее выбранных фенологических фаз:  $s = 3$  (кушение),  $s = 9$  (колошение),  $s = 10$  (цветение),  $s = 11$  (молочная спелость). Это заставляет прибегать к дополнительной разбивке всего периода вегетации на интервалы управления между выбранными фенофазами: 1-й — от кушения до колошения ( $T_3, T_9$ ), 2-й — от колошения до цветения ( $T_9, T_{10}$ ), 3-й — от цветения до молочной спелости ( $T_{10}, T_{11}$ ), 4-й — от молочной спелости до полной спелости ( $T_{11}, T_{13}$ ). Возможен и другой набор фенофаз, при наступлении которых реализуется управление в реальном времени.

Для первого интервала времени между 3-й и 9-й фенофазами модель динамики параметров структуры биомассы посева имеет следующий развёрнутый вид (Михайленко, Тимошин, 2020):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_{1m} \\ \dot{x}_{2m} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} x(t)_{1m} \\ x(t)_{2m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} v_N(t) \\ v_K(t) \\ v_P(t) \\ v_{Mg}(t) \\ v_5(t) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} g_1(t) \\ g_2(t) \end{bmatrix}_m, \quad t \in (T_3, T_9), \end{aligned} \quad (1)$$

где приняты следующие обозначения:  $x_{1m}$  — средняя по площади поля плотность биомассы посева (урожайность) (ц/га);  $x_{2m}$  — средняя по площади поля плотность сырой массы посева (ц/га); внешние возмущения в обоих блоках:  $f_1$  — среднесуточная температура воздушной среды (°C),  $f_2$  — среднесуточный уровень радиации ( $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$ ),  $f_3$  — среднесуточная интенсивность осадков (мм); параметры химического состояния почвы:  $v_N$  — содержание азота (кг/га),  $v_K$  — содержание калия (кг/га),  $v_P$  — содержание фосфора (кг/га),  $v_{Mg}$  — содержание магния (кг/га),  $v_5$  — влагозапас (мм);  $g_{1m}, g_{2m}$  — дозы обработки гербицидами (г/га);  $a_{11m}-a_{22m}, b_{11m}-b_{24m}, c_{11m}-c_{23m}, d_{11m}-d_{22m}$  — параметры модели ( $\text{сут}^{-1}$ ).

В связи с научно-методическим значением настоящей работы мы не раскрываем здесь виды гербицидов, так как развиваемый нами подход реализуем для любых их видов.

Модель (1) для удобства дальнейшего использования необходимо представить в канонической символьной векторно-матричной форме, где все переменные объединены в векторы, а параметры — в соответствующие матрицы:

$$\dot{X}_m = A_m X_m(t) + B_m V(t) + C_m F(t) - D_m G_m(t). \tag{2}$$

Для других интервалов, начиная со второго, —  $(T_9, T_{10})$ ,  $(T_{10}, T_{11})$  и  $(T_{11}, T_{13})$  — модели динамики параметров структуры биомассы посева имеют общий вид и различаются только значениями параметров (Михайленко, Тимошин, 2020):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_{1u} \\ \dot{x}_{2u} \\ \dot{x}_{3u} \end{bmatrix}_j &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} x(t)_{1u} \\ x(t)_{2u} \\ x(t)_{3u} \end{bmatrix}_j + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} v_N(t) \\ v_K(t) \\ v_P(t) \\ v_{Mg}(t) \\ v_5(t) \end{bmatrix}_j + \\ &+ \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix}_j - \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \\ d_{31} & d_{32} \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} g_1(t) \\ g_2(t) \end{bmatrix}_j, \\ j &= 1, t \in (T_9, T_{10}); j = 2, t \in (T_{10}, T_{11}); j = 3, t \in (T_{11}, T_{13}). \end{aligned} \tag{3}$$

В данной модели параметрами состояния являются:  $x_{1u}$  — средняя по площади поля плотность биомассы посева (ц/га),  $x_{2u}$  — средняя по площади поля плотность сырой массы посева (ц/га),  $x_{3u}$  — средняя по площади поля плотность массы колосьев (урожая) (ц/га); внешние возмущения в обоих блоках:  $f_1$  — среднесуточная температура воздушной среды (°C),  $f_2$  — среднесуточный уровень радиации ( $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$ ),  $f_3$  — среднесуточная интенсивность осадков (мм); параметры химического состояния почвы:  $v_N$  — содержание азота (кг/га),  $v_K$  — содержание калия (кг/га),  $v_P$  — содержание фосфора (кг/га),  $v_{Mg}$  — содержание магния (кг/га),  $v_5$  — влагозапас (мм);  $g_{1u}, g_{2u}$  — дозы обработки гербицидами (г/га);  $j = 1, 2, 3$  — номера интервалов управления после фазы колошения;  $a_{11j}-a_{33j}, b_{11j}-b_{35j}, c_{11m}-c_{33j}, d_{11j}-d_{32j}$  — параметры модели ( $\text{сут}^{-1}$ ).

Каноническая символьная векторно-матричная форма модели (3):

$$\dot{X}_{uj} = A_{uj} X_{uj}(t) + B_{uj} V_{uj}(t) + C_{uj} F(t) - D_{uj} G_{uj}(t). \tag{4}$$

В связи с тем, что ОУ является агроценоз, для решения задачи управления его состоянием кроме моделей посева культуры (2), (4) необходимо ввести динамическую модель биомассы доминирующих видов сорняков, векторно-матричная форма которой имеет следующий вид (Михайленко, Тимошин, 2022):

$$\dot{S}_j = A_{sj} S_j(t) + B_s V_j(t) - B_{gj} G_j(t) + C_{sj} F(t), \tag{5}$$

где  $S^T = [s_1 \ s_2]$  — вектор биомасс доминирующих видов сорняков;  $A_s = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 \\ 0 & a_{22} \end{bmatrix}_s$ ,  $B_s = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \end{bmatrix}_s$ ,  $B_g = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \end{bmatrix}_g$ ,  $C_s = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \end{bmatrix}_s$  — матрицы параметров модели.

Модель (5) включает в себя состояния двух доминирующих видов сорняков. Для других условий их число и виды могут отличаться, что только уточняет структуру алгоритмов, но не меняет общий подход к решению задачи.

Модели (2), (4), (5) представляют собой основной блок параметров состояния ОУ. Кроме этого блока ОУ содержит блок передачи управления, которым является почвенная среда (ПС). Именно через данный блок осуществляется конкуренция растений культуры и сорной растительности за элементы питания и влагу.

Модель динамики параметров состояния почвы для фенофаз с 3-й по 9-ю имеет следующий вид (Михайленко, Тимошин, 2022):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{v}_N(t) \\ \dot{v}_K(t) \\ \dot{v}_P(t) \\ \dot{v}_{Mg}(t) \\ \dot{v}_5(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & a_{15} \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & a_{35} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} \end{bmatrix}_{3,9} \begin{bmatrix} v_N(t) \\ v_K(t) \\ v_P(t) \\ v_{Mg}(t) \\ v_5(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_N(t) \\ d_K(t) \\ d_P(t) \\ d_{Mg}(t) \\ d_W(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} \\ 0 & 0 & c_{23} \\ 0 & 0 & c_{33} \\ 0 & 0 & c_{43} \\ c_{51} & c_{52} & 1 \end{bmatrix}_{3,9} \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} - \\ &- \begin{bmatrix} m_{11} & 0 \\ m_{21} & 0 \\ m_{31} & 0 \\ m_{41} & 0 \\ m_{51} & m_{52} \end{bmatrix}_{3,9} \begin{bmatrix} x_{1m}(t) \\ x_{2m}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \\ p_{31} & p_{32} \\ p_{41} & p_{42} \\ p_{51} & p_{52} \end{bmatrix}_{3,9} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} n_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n_{44} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1h}(t) \\ x_{2h}(t) \\ x_{3h}(t) \\ x_{4h}(t) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $d_N, d_K, d_P, d_{Mg}, d_W$  — дозы внесения удобрений (соответственно азотных, калийных, фосфорных (кг/га)) и нормы поливов (мм);  $a_{11,39}-a_{55,39}, c_{13,39}-c_{52,39}, m_{11,39}-m_{52,39}, p_{11,39}-p_{52,39}, n_{11,39}-n_{44,39}$  — параметры модели (сут<sup>-1</sup>).

Модель (6) в компактной векторно-матричной символической форме:

$$\dot{V}_{3,9} = A_{3,9}V(t) + B_{3,9}D(t) + C_{3,9}F(t) - M_{3,9}X_m(t) - P_{3,9}S(t) - N_{3,9}X_h(t). \quad (7)$$

Модели динамики параметров состояния почвы для интервалов  $(T_9, T_{10})$ ,  $(T_{10}, T_{11})$  и  $(T_{11}, T_{13})$  имеют незначительные различия в структуре за счёт массы колосьев:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{v}_N \\ \dot{v}_K \\ \dot{v}_P \\ \dot{v}_{Mg} \\ \dot{v}_5 \end{bmatrix}_j &= \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & a_{15} \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & a_{35} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} v_N(t) \\ v_K(t) \\ v_P(t) \\ v_{Mg}(t) \\ v_5(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_N(t) \\ d_K(t) \\ d_P(t) \\ d_{Mg}(t) \\ d_W(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} \\ 0 & 0 & c_{23} \\ 0 & 0 & c_{33} \\ 0 & 0 & c_{43} \\ c_{51} & c_{52} & 1 \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} - \\ &- \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ m_{21} & 0 & 0 \\ m_{31} & 0 & 0 \\ m_{41} & 0 & 0 \\ m_{51} & m_{52} & 0 \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} x_{1u}(t) \\ x_{2u}(t) \\ x_{3u}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \\ p_{31} & p_{32} \\ p_{41} & p_{42} \\ p_{51} & p_{52} \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} n_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n_{44} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} x_{1h}(t) \\ x_{2h}(t) \\ x_{3h}(t) \\ x_{4h}(t) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (8)$$

Модель (8) в компактной символьной векторно-матричной форме:

$$\dot{V}_j = A_j V(t) + B_j D(t) + C_j F(t) - M_j X_u(t) - P_j S(t) - N_j X_h(t), \quad j = 1, 2, 3. \quad (9)$$

Кроме моделей динамики параметров состояния биомассы фитоценоза и почвенной среды для оценивания указанных параметров необходимы модели их связи с данными дистанционного зондирования Земли (модели ДЗЗ).

Модель оптических измерений (модель ДЗЗ) состояния биомассы посева яровой пшеницы на период до начала колошения (Кочубей и др., 1990; Михайленко, Тимошин, 2021; Рачулик, Ситникова, 1981):

$$\begin{bmatrix} z_{1m} \\ z_{2m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{01} & p_{11}x_{1m} & p_{12}x_{2m} & p_{13}x_{1m}^2 & p_{14}x_{2m}^2 & p_{15}x_{1m}^3 & p_{16}x_{2m}^3 \\ p_{02} & p_{21}x_{1m} & p_{22}x_{2m} & p_{24}x_{2m}^2 & p_{24}x_{2m}^2 & p_{24}x_{2m}^2 & p_{26}x_{2m}^3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_{1m} \\ \xi_{2m} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

или в векторно-матричной символьной форме:

$$Z_m = P_m W(X_m) + \Xi_m, \quad (11)$$

где  $Z_m^T = [z_{1m} \ z_{2m}]$  — вектор параметров отражения в видимом (400–700 нм,  $z_1$ ) и ближнем инфракрасном (750–950 нм,  $z_2$ ) диапазонах;  $P = \begin{bmatrix} p_{01} & p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} \\ p_{02} & p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} \end{bmatrix}$  — матрица

параметров модели;  $W(X_m) = [1 \ x_{1m} \ x_{2m} \ x_{1m}^2 \ x_{2m}^2 \ x_{1m}^3 \ x_{2m}^3]$  — вектор-функция, где аргументами являются параметры состояния посева:  $x_{1m}$  — плотность биомассы (урожай) (ц/га);  $x_{2m}$  — плотность сырой массы (ц/га);  $\Xi_m$  — случайный вектор ошибок оптических измерений с нулевым средним и матрицей ковариаций  $K_z$ .

Модель оптических измерений (модель ДЗЗ) состояния биомассы посева яровой пшеницы на период от начала колошения до созревания урожая отличается от модели (11) только размерностью:

$$\begin{bmatrix} z_{1u} \\ z_{2u} \\ z_{3u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{10,u} & p_{11,u}x_{1u} & p_{12,u}x_{2u} & p_{13,u}x_{3u} & p_{14,u}x_{1u}^2 & p_{15,u}x_{2u}^2 \\ p_{20,u} & p_{21,u}x_{1u} & p_{22,u}x_{2u} & p_{23,u}x_{3u} & p_{24,u}x_{1u}^2 & p_{25,u}x_{2u}^2 \\ p_{30,u} & p_{31,u}x_{1u} & p_{32,u}x_{2u} & p_{33,u}x_{3u} & p_{34,u}x_{1u}^2 & p_{35,u}x_{2u}^2 \\ p_{16,u}x_{3u}^2 & p_{17,u}x_{1u}^3 & p_{18,u}x_{2u}^3 & p_{19,u}x_{3u}^3 \\ p_{26,u}x_{3u}^2 & p_{27,u}x_{1u}^3 & p_{28,u}x_{2u}^3 & p_{29,u}x_{3u}^3 \\ p_{36,u}x_{3u}^2 & p_{37,u}x_{1u}^3 & p_{38,u}x_{2u}^3 & p_{39,u}x_{3u}^3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_{1u} \\ \xi_{2u} \\ \xi_{3u} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

или в векторно-матричной символьной форме:

$$Z_u = P_u W(X_u) + \Xi_u, \quad (13)$$

где  $Z_u^T = [z_{1u} \ z_{2u} \ z_{3u}]$  — вектор интегрированных параметров отражения в зелёном (500–565 нм,  $z_{1u}$ ), красном (625–740 нм,  $z_{2u}$ ) и ближнем инфракрасном (750–950 нм,  $z_{3u}$ ) диапазо-

нах;  $P_u = \begin{bmatrix} p_{01} & p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} & p_{17} & p_{18} & p_{19} \\ p_{02} & p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} & p_{27} & p_{28} & p_{29} \\ p_{03} & p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} & p_{36} & p_{37} & p_{38} & p_{39} \end{bmatrix}_u$  — матрица параметров модели;

$W(X_u) = [1 \ x_{1u} \ x_{2u} \ x_{3u} \ x_{1u}^2 \ x_{2u}^2 \ x_{3u}^2 \ x_{1u}^3 \ x_{2u}^3 \ x_{3u}^3]$  — вектор-функция, где аргументами являются параметры состояния посева:  $x_{1u}$  — средняя по площади поля плотность биомассы (ц/га),  $x_{2u}$  — средняя по площади поля плотность сырой массы (ц/га),  $x_{3u}$  — средняя по площади поля плотность массы колосьев (ц/га);  $\Xi_u$  — случайный вектор ошибок оптических измерений с нулевым средним и матрицей ковариаций  $K_{z_s}$ .

Модель оптических измерений (модель ДЗЗ) параметров биомассы сорняков имеет вид, аналогичный модели (13), отличаясь только значениями параметров:

$$Z_s = P_s W(S) + \Xi_s. \quad (14)$$

### Алгоритмы оценивания параметров состояния агроценоза

Парные алгоритмы оценивания параметров состояния посева и сорняков имеют одинаковый вид для всех межфазных интервалов времени и различаются только используемыми моделями:

- для параметров состояния посева с использованием моделей (2), (4), (11), (13) (Казаков, 1987; Mikhailenko, 2022):

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{X}} &= A \hat{X}(t) + B V(t) + C F(t) + R(t) \frac{\partial W^T(P, \hat{X})}{\partial \hat{X}} K_z^{-1} (\tilde{Z}(t) - P W(\hat{X})), \\ \dot{R}(t) &= R(t) A^T + A R(t) - R(t) \frac{\partial W^T(P, \hat{X})}{\partial \hat{X}} K_z^{-1} \frac{\partial W(P, \hat{X})}{\partial \hat{X}} P^T R(t); \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

- для параметров состояния сорняков с использованием моделей (5), (14) (Михайленко, Тимошин, 2021):

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{S}}(t) &= A_s \hat{S}(t) + B_s V(t) + C_s F(t) + R_s(t) \frac{\partial W^T(P_s, \hat{S})}{\partial \hat{S}} K_{zs}^{-1} (Z_s(t) - P_s W(\hat{S})), \\ \dot{R}_s(t) &= R_s(t) A_s^T + A_s R_s(t) - R_s(t) \frac{\partial P_s W(S)}{\partial S} K_{zs}^{-1} \frac{\partial P_s W(S)}{\partial S} P_s^T R_s(t), \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где  $R, R_s$  — матрицы ковариаций ошибок оценивания.

### Алгоритмы управления по фенофазам

Как было указано выше, управление состоянием агроценоза, заключающееся во внесении удобрений, обработках гербицидами и поливах, проводится в фиксированные моменты времени наступления следующих заранее выбранных фенологических фаз:  $s = 3$  (кущение),  $s = 9$  (колошение),  $s = 10$  (цветение),  $s = 11$  (молочная спелость). За счёт последовательности этих пофазных управлений обеспечивается перевод состояния посева яровой пшеницы от фазы прорастания семян к полной зрелости зерна и достижение поставленной цели управления. В обозначенных параметрах состояния посева формально цель управления выглядит следующим образом для последнего ( $j = 3$ ) межфазного интервала управления в момент созревания зерна  $T_{13}$ :

$$x_{1j=3}(T_{13}) \geq 2,1U^*, \quad x_{2j=3}(T_{13}) \leq 0,15U^*, \quad x_{3j=3}(T_{13}) \geq U^*, \quad (17)$$

где  $U^*$  — заданная урожайность яровой пшеницы (ц/га).

Для каждого предшествующего межфазного интервала времени задаются оптимальные локальные цели управления, обеспечивающие достижение конечной цели (17). Формирование этих локальных целей осуществляется в результате реализации программного управления состоянием агроценоза (Михайленко, Тимошин, 2020). Этот уровень управления, предшествующий уровню управления в реальном времени, формирует оптимальную программу эволюции состояния посева на всём интервале вегетации. Данная программа представляет собой последовательность векторов параметров состояния посева, задающих локальные цели управления в реальном времени, которая обозначается следующим образом:

$$X_m^*(T_9), \quad X_u^*(T_{10}), \quad X_u^*(T_{11}), \quad X_u^*(T_{13}). \quad (18)$$

Подобные цели задаются и для сорных растений в составе агроценоза:

$$S^*(T_9), S^*(T_{10}), S^*(T_{11}), S^*(T_{13}). \quad (19)$$

Для каждого межфазного периода управления задаются локальные критерии оптимальности:

$$J_j(T_j) = [X_j(T_j) - X_j^*(T_j)]^T G [X_j(T_j) - X_j^*(T_j)] + [S_j(T_j) - S_j^*(T_j)]^T Q [S_j(T_j) - S_j^*(T_j)], \quad (20)$$

где  $G, Q$  — весовые матрицы, посредством которых устанавливаются требуемые соотношения между отдельными параметрами состояния посева культуры и сорняков;  $j = 0, \dots, 3$  — индексы межфазных интервалов общего периода вегетации.

С учётом введённых моделей и алгоритмов оценивания параметров состояния общий алгоритм управления реальным временем включает в себя следующие шаги:

**Шаг 0.** В результате реализации задачи программного управления формируется последовательность локальных целей управления по фенофазам (18).

**Шаг 1.** С начала периода вегетации вплоть до наступления фенофазы  $s = 3$  (кущение) оцениваются параметры состояния посева (по алгоритму (15)) и параметры состояния сорняков (по алгоритму (16)).

**Шаг 2.** Оценка вектора параметров биомассы посева культуры  $\widehat{X}_m(T_3)$  принимается в качестве начального условия в модели (2) при формировании управления в момент времени  $T_3$ . Это управление находится путём минимизации критерия (20) по вектору параметров технологических операций  $D(T_3)$  и вектору обработок гербицидами  $G(T_3)$ , в который подставляются заданные значения вектора параметров состояния посева  $X_m^*(T_9)$  и вектора параметров состояния сорняков  $S^*(T_9)$ , которые должны быть достигнуты по результатам управления. Минимизация критерия (20) по векторам  $D(T_3)$  и  $G(T_3)$  также проводится в соответствии с алгоритмом программного управления (Михайленко, Тимошин, 2020), который в силу большого объёма здесь не приводится.

**Шаг 3.** Полученное управление в реальном времени  $\delta D(T_3)$  вводится в модель (6) параметров состояния почвенной среды, а вектор обработок гербицидами  $G(T_3)$  подставляется в модель (5). Осуществляется переход к шагу 1, и вся последовательность операций повторяется для фенофазы  $s = 9$  и последующих фенофаз, вплоть до фенофазы  $s = 11$  и получения заданного конечного результата.

## Апробация и обсуждение результатов

Апробация предложенной теории управления осуществлялась по экспериментальным данным, полученным в период 2016–2021 гг. на Меньковском биополигоне Агрофизического научно-исследовательского института (Ленинградская обл., Гатчинский р-н, д. Меньково). Посевы яровой пшеницы входили в состав севооборота. Для формирования базы данных (БД) экспериментов на выделенных 20 тестовых площадках отбирались пробы биомассы агроценоза и почвы. Одновременно с отбором проб проводилось дистанционное зондирование опытного поля с агроценозом посредством беспилотного летательного аппарата «Геоскан-1», оборудованного малогабаритной гиперспектральной камерой, разработанной в Федеральной политехнической школе Лозанны (Швейцария) (*фр.* École polytechnique fédérale de Lausanne). Сформированная таким образом БД стала источником информации для идентификации всех используемых математических моделей на всём периоде вегетации.

Как уже было указано выше, процедура управления начинается с формирования оптимальной программы эволюции агроценоза на планируемый период вегетации. Для этого используется алгоритм программного управления, результатом которого выступает последовательность векторов параметров состояния посева яровой пшеницы, задающих локальные цели управления в реальном времени (18). Для рассматриваемого примера эта последовательность представлена на *рис. 1* (см. с. 79) (для заданного урожая 50 ц/га).

Следующим шагом общего алгоритма управления становится процедура оценивания параметров состояния посева по данным ДЗЗ на фенофазах, в которых реализовывалось управ-

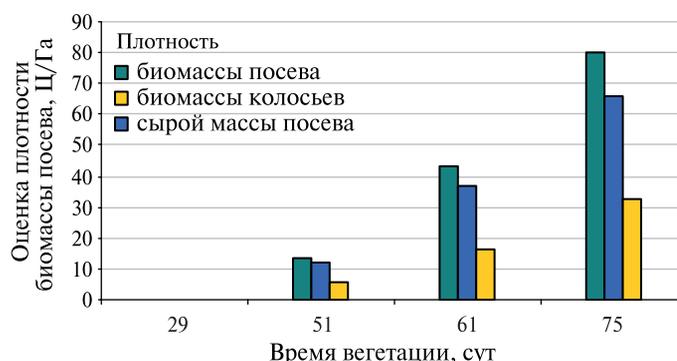
ление в реальном времени. Последовательность таких оценок представлена на *рис. 2*. Оценки параметров состояния на фенофазах  $s = 3$  на *рис. 2* не показаны в силу их малой величины.

На основе оценок, представленных на *рис. 2*, формируются управления (*рис. 3*), обеспечивающие достижение локальных целей (см. *рис. 1*).

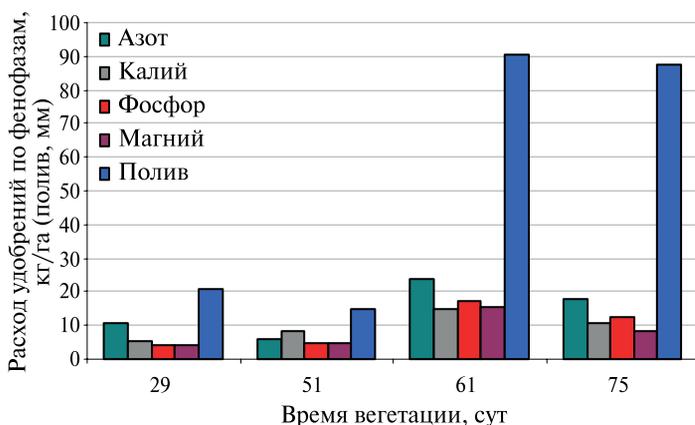
Управления, представленные на *рис. 3*, обеспечивают оптимальное развитие посева яровой пшеницы на всём интервале вегетации (*рис. 4*).



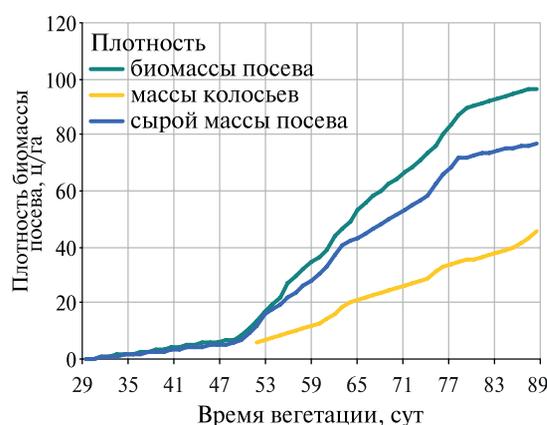
*Рис. 1.* Диаграмма векторов параметров состояния посева яровой пшеницы, задающих локальные цели управления в реальном времени



*Рис. 2.* Оценки параметров состояния посева яровой пшеницы на фенофазах, в которых осуществляется управление



*Рис. 3.* Управления состоянием посева яровой пшеницы по фенофазам

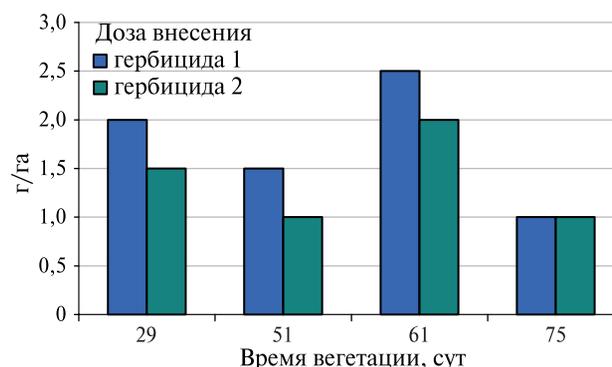


*Рис. 4.* Оптимальная программа эволюции посева яровой пшеницы на всём периоде вегетации

Аналогичным образом формируются управления состоянием сорных растений (*рис. 5*).

Управление, представленное на *рис. 5*, обеспечивает эволюцию параметров состояния сорных растений на всём интервале вегетации (*рис. 6*, см. с. 80).

Как видно из графиков на *рис. 4*, управление в виде доз внесения минеральных удобрений и норм поливов обеспечивает достижение заданной цели управления (урожая зерна 50 ц/га).



*Рис. 5.* Управления состоянием сорных растений агроценоза

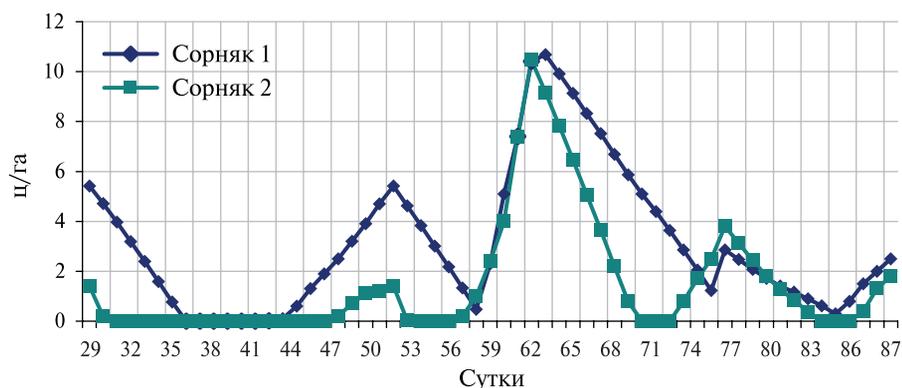


Рис. 6. Эволюция параметров состояния сорных растений на периоде вегетации

Графики на рис. 6 показывают, что управление состоянием сорных растений в виде доз обработок гербицидами обеспечивает минимизацию биомассы сорных растений в конце периода вегетации. При этом внесение минеральных удобрений и обработки гербицидами осуществляются совместно, в один и тот же момент времени.

Разработанная теория и алгоритмическая схема её реализации применима для любых агроценозов с разными культурами. Основным условием применения являются математические модели параметров состояния посева культуры и сорных растений, а также модели связи этих параметров с данными ДЗЗ. При этом модели имеют вид и форму, аналогичные моделям, приведённым в статье, и отличаются только размерностью и величиной параметров, а ввод моделей других агроценозов не меняет основные положения теории и алгоритмическую схему реализации.

## Выводы

Предложена теория управления состоянием агроценоза, включающая в себя алгоритмы оценивания параметров состояния посева культуры и сорных растений, а также алгоритмы формирования управлений на заданных фенологических фазах развития растений культуры. При этом управлениями состоянием посева культуры являются дозы внесения минеральных удобрений и поливы, а управлениями состоянием сорных растений — дозы обработок гербицидами, проводимых совместно в один и тот же момент времени с внесением удобрений. Исходной базой для решения задачи управления является оптимальная программа развития растений культуры, полученная при предварительном решении задачи программного управления. Причём целью управления в реальном времени становится достижение оптимальных значений параметров состояния посева культуры, полученных в оптимальной программе для моментов времени наступления заданных фенофаз, включая фенофазу полного созревания урожая. Достижение всех локальных целей управления осуществляется за счёт оптимизации доз внесения удобрений, поливов и доз обработок гербицидами, проводимой на основе оценок параметров состояния посева культуры и сорных растений, полученных на фенофазах, в которых осуществляется управление состоянием агроценоза.

## Литература

1. Антонов В. Н., Сладких Л. А. Мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности яровой пшеницы по данным дистанционного зондирования // Геоматика. 2009. № 4. С. 50–53.
2. Барталев С. А., Лупян Э. А., Нейштадт И. А., Савин И. Ю. Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 3. С. 68–75.
3. Емельянов Ю. Я., Копылов Е. В., Кириллова Е. В. Эффективность гербицидов в сочетании с удобрениями на яровой пшенице // Нивы Зауралья. 2013. № 6(106). С. 76–77.
4. Казаков И. Е. Методы оптимизации стохастических систем. М.: Наука, 1987. 384 с.

5. Корсаков К. В., Стрижков Н. И., Пронько В. В. Совместное применение удобрений, гербицидов и регуляторов роста при возделывании овса и проса в Поволжье // Вестн. Алтайского гос. аграр. ун-та. 2013. № 4(102). С. 16–19.
6. Кочубей С. М., Шадчина Т. М., Кобец Н. И. Спектральные свойства растений как основа дистанционных методов диагностики. Киев: Наукова думка, 1990. 134 с.
7. Марчуков В. С. Теория и методы тематической обработки аэрокосмических изображений на основе многоуровневой сегментации: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2011. 42 с.
8. Михайленко И. М. Теоретические основы и техническая реализация управления агротехнологиями. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2017. 250 с.
9. Михайленко И. М., Тимошин В. Н. Оценивание химического состояния почвенной среды по данным дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 18. № 4. С. 125–134. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-102-113.
10. Михайленко И. М., Тимошин В. Н. Программное управление параметрами состояния почвы под посевами яровой пшеницы // Агрохимия. 2020. № 8. С. 86–93. DOI: 10.31857/S0002188120080062.
11. Михайленко И. М., Тимошин В. Н. Оценивание параметров агроценозов по данным дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 102–114. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-102-114.
12. Михайленко И. М., Тимошин В. Н. Программный уровень общего управления агроценозом с учетом влияния сорной растительности на состояние посева культуры // Сельскохозяйств. биология. 2022. Т. 57. № 3. С. 500–517. DOI: 10.15389/agrobiology.2022.3.500rus.
13. Немченко В. В., Рыбина Л. Д., Гилев С. Д., Кунгурцева Н. М., Степных Н. В., Копылов А. Н., Копылова С. В. Современные средства защиты растений и технологии их применения. Куртамыш, 2006. 348 с.
14. Рачулик В. И., Ситникова М. В. Отражательные свойства и состояние растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 287 с.
15. Crippen R. E. Calculating the Vegetation Index Faster // Remote Sensing of Environment. 1990. V. 34. P. 71–73. DOI: 10.1016/0034-4257(90)90085-Z.
16. Datt B. A New Reflectance Index for Remote Sensing of Chlorophyll Content in Higher Plants: Tests Using Eucalyptus Leaves // J. Plant Physiology. 1999. V. 1. P. 30–36. DOI: 10.1016/S0176-1617(99)80314-9.
17. Derby N. E., Casey F. X. M., Franzen D. E. Comparison of nitrogen management zone delineation methods for corn grain yield // Agronomy J. 2007. V. 99. P. 405–414. DOI: 10.2134//AGRONJ.2006.0027.
18. Gamon J. A., Serrano L., Surfus J. S. The Photochemical Reflectance Index: An Optical Indicator of Photosynthetic Radiation Use Efficiency Across Species. Functional Types and Nutrient Levels // Ecologia. 1997. V. 4. P. 492–501. DOI: 10.1007/s004420050337.
19. Heatherly L. G., Elmore T. W. Managing inputs for peak production / eds. J. E. Specht, H. R. Boerma // Soybeans: Improvement, Production and Uses. Madison: ASA-CSSA-SSSA, 2004. P. 451–536. DOI: 10.2134/agronmonogr16.3ed.c10.
20. Jouven M., Carrère P., Baumont R. Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 1. Model description // Grass and Forage Science. 2006. V. 61. Iss. 2. P. 112–124. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2006.00517.x>.
21. Kim K., Chavas J. P. Technological change and risk management: An application to the economics of corn production // Agricultural Economics. 2003. V. 29. P. 125–142. DOI: 10.1016/S0169-5150(03)00081-1.
22. Mikhailenko I. M. (2013a) Assessment of crop and soil state using satellite remote sensing data // Intern. J. Information Technology and Operations Management. 2013. V. 1. No. 5. P. 41–52.
23. Mikhailenko I. M. (2013b) Control of crop state using remote sensing information // Intern. J. Mathematical Modeling and Applied Computing. 2013. V. 1. No. 5. P. 18–25.
24. Mikhailenko I. M. Estimation of Parameters of Biomass State of Sowing Spring Wheat // Remote Sensing. 2022. V. 14. Iss. 6. Art. No. 1388. <https://doi.org/10.3390/rs14061388>.
25. Mikhailenko I. M., Timoshin V. N. Development of a methodology for assessing the parameters of the state of crops and soil environment for crops according to remote sensing of the Earth // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2020. No. 548. Art. No. 052027. DOI: 10.1088/1755-1315/548/5/052027.
26. Roudier P., Tisseyre B., Poilve H., Roger J.-M. A technical opportunity index adapted to zone-specific management // Precision Agriculture. 2011. V. 12. P. 130–145. DOI: 10.1007/s11119-010-9160-y.
27. Sami K., Kushal K. C., John P. F., Scott S., Erdal O. Remote Sensing in Agriculture – Accomplishments, Limitations, and Opportunities // Remote Sensing. 2020. V. 12(22). Art. No. 3783. <https://doi.org/10.3390/rs12223783>.
28. Sanderson M. A., Rotz C. A., Fultz S. W., Rauburn E. B. Estimating forage mass with a commercial capacitance meter, rising plate meter, and pasture ruler // Agronomy J. 2001. V. 93. P. 1281–1286. <https://doi.org/10.2134/agronj2001>.
29. Sims D. A., Gamon J. A. Relationships Between Leaf Pigment Content and Spectral Reflectance Across a Wide Range of Species, Leaf Structures and Developmental Stages // Remote Sensing of Environment. 2002. P. 337–354. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00010-X.

30. Steven M. Satellite remote sensing for agricultural management: Opportunities and logistic constraints ISPRS // J. Photogrammetry and Remote Sensing. 1993. V. 48. P. 29–34. DOI: 10.1016/0924-2716(93)90029-M.
31. Thompson J., Krogh P. H. A qualitative multi-attribute model for assessing the impact of cropping systems on soil quality // Pedobiologia. 2007. V. 51(3). P. 239–250. DOI: 10.1016/j.pedobi.2007.03.006.
32. Tisseyre B., McBratney A. B. A technical opportunity index based on mathematical morphology for site-specific management: an application to viticulture // Precision Agriculture. 2008. V. 9. P. 101–113. DOI: 10.1007/s11119-008-9053-5.

## Control of the state of agroecosystems based on Earth remote sensing data

I. M. Mikhailenko, V. N. Timoshin

*Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg 195220, Russia*  
*E-mails: ilya.mihailenko@yandex.ru, v.timoshin@yandex.ru*

The purpose of this work is to present new results of using Earth remote sensing data in the problem of managing agricultural technology in real time. The main reason for the low efficiency of modern precision farming technologies is the lack of an adequate theory of agricultural technology management. At the same time, when creating such a theory, one should take into account the fact that the object of management, which is agricultural technology, includes agroecosystems, in which, in addition to sowing a crop, weeds are also included. Failure to take this factor into account leads to a deterioration in management efficiency, a decrease in sowing productivity and an over expenditure of mineral fertilizers and herbicides. In the presented work, for the first time, a complete theory of managing the state of agroecosystems is presented. This theory makes it possible to obtain a given yield with the required reliability. Such management is formed on the basis of estimates of the parameters of the state of sowing crops and weeds, formed according to remote sensing data in real time. The presented theory is based on new mathematical models of parameters of the state of agricultural crops, soil environment, weeds, as well as models of the relationship of these parameters with remote sensing data. Control factors in agricultural technology are mineral fertilizers, herbicides and irrigation. Naturally, the parameters of technological operations are the doses of applied mineral fertilizers and herbicides, as well as irrigation rates. These operations are carried out at the onset of certain phenological phases of sowing crops. Remote sensing data are entered precisely at such moments of time when the parameters of the state of crops and weeds are estimated on their basis. The presented theory is based on classical control principles used in modern dynamic systems. According to the proposed theory, a specialized software package was developed, with the help of which the control system was tested on the example of spring wheat sowing.

**Keywords:** agricultural technologies, agroecosystems, state parameters, crop sowing, weeds, parameter estimation, control, real time

Accepted: 01.06.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-71-84

## References

1. Antonov V., Sladkih L., Crop monitoring and spring wheat yields forecasting basing on remote sensing data, *Geomatika*, 2009, No. 4, pp. 50–53 (in Russian).
2. Bartalev S. A., Loupian E. A., Neishtadt I. A., Savin I. Yu., Gropland area classification in south regions of russia using MODIS satellite data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 3, pp. 68–75 (in Russian).
3. Emelyanov Yu. Ya., Kopylov E. V., Kirillova E. V., Efficiency of herbicides in combination with fertilizers on spring wheat, *Nivy Zaural'ya*, 2013, No. 6(106), pp. 76–77 (in Russian).
4. Kazakov I. E., *Metody optimizatsii stokhasticheskikh system* (Methods for optimizing stochastic systems), Moscow: Science, 1987, 484 p. (in Russian).

5. Korsakov K. V., Strizhkov N. I., Pronko V. V., Combined application of fertilizers, herbicides and plant growth regulators in oat and millet in the Volga region, *Vestnik Alta'skogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2013, No. 4(102), pp. 16–19 (in Russian).
6. Kochubey S. M., Shadchina T. M., Kobets N. I., *Spektral'nye svoystva rastenii kak osnova distantsionnykh metodov diagnostiki* (Spectral properties of plants as a basis for remote diagnostic methods), Kyiv: Science thought, 1990, 134 p. (in Russian).
7. Marchukov V. S., *Teoriya i metody tematicheskoi obrabotki aerokosmicheskikh izobrazhenii na osnove mnogorovnevoi segmentatsii: Diss. dokt. tekhn. nauk* (Theory and methods of thematic processing of aerospace images based on multilevel segmentation, Dr. techn. sci. thesis), Moscow: 2011, 42 p. (in Russian).
8. Mikhailenko I. M., *Teoreticheskie osnovy i tekhnicheskaya realizatsiya upravleniya agrotekhnologiyami* (Theoretical foundations and technical implementation of agricultural technology management), Saint Petersburg: SPbGTU, 2017, 250 p. (in Russian).
9. Mikhailenko I. M., Timoshin V. N., Estimation of the chemical state of the soil environment according to the data of remote sensing of the Earth, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 18, No. 4, pp. 125–134 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-102-113.
10. Mikhailenko I. M., Timoshin V. N., Software management of soil fertility parameters under spring wheat crops, *Agrochemistry*, 2020, No. 8, pp. 86–93 (in Russian), DOI: 10.31857/S0002188120080062.
11. Mikhailenko I. M., Timoshin V. N., Estimation of parameters of agrocenoses according to the data of remote sensing of the Earth, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 102–114 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-102-114.
12. Mikhailenko I. M., Timoshin V. N., Program level of agrocenosis management, taking into account the impact of weeds on crops, *Agricultural biology*, 2022, Vol. 57, No. 3, pp. 500–517 (in Russian), DOI: 10.15389/agrobiology.2022.3.500rus.
13. Nemchenko V. V., Rybina L. D., Gilev S. D., Kungurtseva N. M., Stepnykh N. V., Kopylov A. N., Kopylova S. V., *Sovremennye sredstva zashchity rastenii i tekhnologii ikh primeneniya* (Modern plant protection products and technologies for their application), Kurtamysh, 2006, 348 p. (in Russian).
14. Rachkulik V. I., Sitnikova M. V., *Otrazhatel'nye svoystva i sostoyanie rastitel'nogo pokrova* (Reflective properties and condition of vegetation cover), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981, 287 p. (in Russian).
15. Crippen R. E., Calculating the Vegetation Index Faster, *Remote Sensing of Environment*, 1990, Vol. 34, pp. 71–73, DOI: 10.1016/0034-4257(90)90085-Z.
16. Datt B., A New Reflectance Index for Remote Sensing of Chlorophyll Content in Higher Plants: Tests Using Eucalyptus Leaves, *J. Plant Physiology*, 1999, Vol. 1, pp. 30–36, DOI: 10.1016/S0176-1617(99)80314-9.
17. Derby N. E., Casey F. X. M., Franzen D. E., Comparison of nitrogen management zone delineation methods for corn grain yield, *Agronomy J.*, 2007, Vol. 99, pp. 405–414, DOI: 10.2134//AGRONG.2006.0027.
18. Gamon J. A., Serrano L., Surfus J. S., The Photochemical Reflectance Index: An Optical Indicator of Photosynthetic Radiation Use Efficiency Across Species. Functional Types and Nutrient Levels, *Ecologia*, 1997, Vol. 4, pp. 492–501, DOI: 10.1007/s004420050337.
19. Heatherly L. G., Elmore T. W., Managing inputs for peak production, In: *Soybeans: Improvement, Production and Uses*, J. E. Specht, H. R. Boerma (eds.), Madison: ASA-CSSA-SSSA, 2004, pp. 451–536, DOI: 10.2134/agronmonogr16.3ed.c10.
20. Jouven M., Carrère P., Baumont R., Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures, 1. Model description, *Grass and Forage Science*, 2006, Vol. 61, Issue 2, pp. 112–124, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2006.00517.x>.
21. Kim K., Chavas J. P., Technological change and risk management: An application to the economics of corn production, *Agricultural Economics*, 2003, Vol. 29, pp. 125–142, DOI: 10.1016/S0169-5150(03)00081-1.
22. Mikhailenko I. M. (2013a), Assessment of crop and soil state using satellite remote sensing data, *Intern. J. Information Technology and Operations Management*, 2013, Vol. 1, No. 5, pp. 41–52.
23. Mikhailenko I. M. (2013b), Control of crop state using remote sensing information, *Intern. J. Mathematical Modeling and Applied Computing*, 2013, Vol. 1, No. 5, pp. 18–25.
24. Mikhailenko I. M., Estimation of Parameters of Biomass State of Sowing Spring Wheat, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Issue 6, Art. No. 1388, <https://doi.org/10.3390/rs14061388>.
25. Mikhailenko I. M., Timoshin V. N., Development of a methodology for assessing the parameters of the state of crops and soil environment for crops according to remote sensing of the Earth, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2020, No. 548, Art. No. 052027, DOI: 10.1088/1755-1315/548/5/052027.
26. Roudier P., Tisseyre B., Poilve H., Roger J.-M., A technical opportunity index adapted to zone-specific management, *Precision Agriculture*, 2011, Vol. 12, pp. 130–145, DOI: 10.1007/s11119-010-9160-y.
27. Sami K., Kushal K. C., John P. F., Scott S., Erdal O., Remote Sensing in Agriculture – Accomplishments, Limitations, and Opportunities, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12(22), Art. No. 3783, <https://doi.org/10.3390/rs12223783>.

28. Sanderson M. A., Rotz C. A., Fultz S. W., Rauburn E. B., Estimating forage mass with a commercial capacitance meter, rising plate meter, and pasture ruler, *Agronomy J.*, 2001, Vol. 93, pp. 1281–1286, <https://doi.org/10.2134/agronj2001>.
29. Sims D. A., Gamon J. A., Relationships Between Leaf Pigment Content and Spectral Reflectance Across a Wide Range of Species, Leaf Structures and Developmental Stages, *Remote Sensing of Environment*, 2002, pp. 337–354, DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00010-X.
30. Steven M., Satellite remote sensing for agricultural management: Opportunities and logistic constraints ISPRS, *J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 1993, Vol. 48, pp. 29–34, DOI: 10.1016/0924-2716(93)90029-M.
31. Thompson J., Krogh P. H., A qualitative multi-attribute model for assessing the impact of cropping systems on soil quality, *Pedobiologia*, 2007, Vol. 51(3), pp. 239–250, DOI: 10.1016/j.pedobi.2007.03.006.
32. Tisseyre B., McBratney A. B., A technical opportunity index based on mathematical morphology for site-specific management: an application to viticulture, *Precision Agriculture*, 2008, Vol. 9, pp. 101–113, DOI: 10.1007/s11119-008-9053-5.