Оценивание химического состояния почвенной среды по данным 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

Управление параметрами химического состояния почв за счёт внесения минеральных удобрений является важнейшим технологическим компонентом в современных системах точного земледелия. Эта проблема положительно не решена до настоящего времени. Здесь существенным сдерживающим фактором является отсутствие методов и средств оценивания параметров химического состояния на больших площадях сельскохозяйственных полей. Целью настоящего исследования является создание научно-методических основ для решения задачи оценивания параметров химического состояния почв на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В связи с недоступностью для ДЗЗ химического состояния почвы оценивание его параметров осуществляется в два этапа. На первом этапе оцениваются массовые и химические параметры состояния посева сельскохозяйственной культуры, а на втором этапе по этим оценкам строятся оценки параметров химического состояния почвы. Основу предлагаемой методики составляют математические модели: параметров отражения массовых и химических характеристик состояния посева (ДЗЗ), зависимости величины урожая от параметров химического состояния почв для отдельных культур. При этом для построения оценок параметров по данным ДЗЗ использовался алгоритм оптимальной фильтрации. Полученные оценки можно использовать для управления параметрами химического состояния почвы в системах точного земледелия.

Ключевые слова: точное земледелие, управление агротехнологиями, дистанционное зондирование Земли, математические модели, алгоритмы оценивания параметров

Одобрена к печати: 12.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-102-113

Введение

Среди компонентов «умного сельского хозяйства» центральное место занимают технологии точного земледелия (ТЗ), включающее в себя комплекс современных информационных технологий и роботизированных технологических машин. По своей сути такой комплекс направлен на решение задач управления агротехнологиями (Михайленко, 2005; Точное..., 2009). При этом основной технологической операцией, посредством которой формируется урожай культур, является внесение минеральных удобрений. В то же время оптимизация доз внесения удобрений — одна из центральных и положительно не решённых до настоящего времени проблем. Её решение сдерживается отсутствием достоверной информации о содержании основных химических элементов питания растений в почве, т.е. о параметрах химического состояния почвы. Выборочные обследования полей с механическим отбором проб в отдельных точках, проводимых в конце периода вегетации, очень трудоёмки и дороги, а самое главное не обладают достаточной точностью, требуемой для решения задач управления и принятия решений. Сложившееся положение делает очень актуальным использование такого высокопроизводительного современного средств мониторинга, как дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ). Однако, несмотря на очевидный прогресс в области применения средств ДЗЗ, наблюдается явное отставание в развитии методов использования этой информации в системах поддержки принятия управленческих решений в ТЗ. В то же время стали появляться работы, в которых проявляется стремление использовать данные ДЗЗ для оценивания некоторых химических параметров растений в посевах (азота, каротиноидов, хлорофилла и др.) (Zarco-Tejada et al., 2013; Quemada et al., 2014). Такой поворот в ориентации исследований представляется очень перспективным для постепенного перехода к оцениванию параметров системы «почва – посев». В этом направлении представляют большой интерес работы, выполненные исследователями Федеральной политехнической школы Лозанны, в стенах которой был разработан малогабаритный мультиспектральный приёмник, обладающий массой, позволяющей размещать его на беспилотных летательных аппаратах (Akhtman et al., 2017; Jaud et al., 2018). В этих работах показано, что данные о спектральных характеристиках растений, полученные посредством миниатюрной мультиспектральной камеры формирования изображений, позволяют пользователям быстро и с высокой степенью надёжности определять различные показатели состояния сельскохозяйственных культур и тем самым повышать эффективность агротехнической практики и использования земельных ресурсов, а также способствовать реализации концепции T3.

Как следует из анализа современных работ в области применения ДЗЗ в сельском хозяйстве, в настоящее время пока не созданы информационно-методические основы оценивания параметров химического состояния почвы на основе данных ДЗЗ. Целью настоящей работы является устранение этого пробела, что позволит более полно использовать современные возможности средств ДЗЗ для решения многих задач управления в ТЗ.

Постановка задачи

Разработки новых мультиспектральных средств ДЗЗ позволяют получать оперативную информацию о параметрах химического состояния посевов, косвенно связанных с аналогичными почвенными параметрами. На *рис. 1–3* представлены карты содержания азота N, калия K и фосфора P в растениях кукурузы на ферме Кауаро в Бразилии. Они получены исследователями компании Gamaya (https://gamaya.com), созданной при Федеральной политехнической школе Лозанны. Как видно из этих изображений, основные элементы питания растений имеют различные спектральные шкалы, что говорит об информативности синего, зелёного и красного оптических диапазонов ДЗЗ по отношению к химическим параметрам растений.

Для использования этой информации в задаче оценивания нам необходимо ввести в рассмотрение две математические модели. Первая из них — это динамическая модель, учитывающая все факторы, влияющие на химические параметры растений. Она является источником априорной информации о химических параметрах растений. Вторая модель отражает связь этих параметров с показателями оптического отражения в синем, зелёном и красном диапазонах.





Рис. 1. Пример распределения параметров спектрального отражения в зависимости от содержания азота в биомассе посева кукурузы

Рис. 2. Пример распределения параметров спектрального отражения в зависимости от содержания калия в биомассе посева кукурузы



Рис. 3. Пример распределения параметров спектрального отражения в зависимости от содержания фосфора в биомассе посева кукурузы

Эта модель является источником апостериорной информации о химических параметрах растений. Она должна учитывать и перекрёстные связи между оптическими каналами. Учитывая тот факт, что параметры химического состояния физически отражают содержание химического элемента (г·кг⁻¹), в комплексе используемых моделей нам потребуется модель динамики массовых параметров посева по площади поля. Для реализации процедуры оценивания массовых показателей посева необходима и модель связи этих параметров с показателями оптического отражения в используемых каналах ДЗЗ.

Наконец, для получения искомых оценок химических параметров почвы нам потребуется динамическая модель, учитывающая прямую и обратную связь этих параметров с параметрами химического состояния растений в посеве и с массовыми показателями посева.

Таким образом, построение мониторинговых оценок параметров химического состояния почвы возможно только при моделировании всех компонентов системы «почва – посев». Эта система включает в себя описанные ниже математические модели.

Модель оптических измерений состояния биомассы посевов

Для массовых показателей посева модель оптических параметров отражения относительно массовых показателей посева имеет следующий вид (Михайленко, 2011):

$$z_{1m} = p_{10,m} + p_{11,m}x_{1m} + p_{12,m}x_{2m} + p_{13,m}x_{1m}^2 + p_{14,m}x_{2m}^2 + p_{15,m}x_{1m}^3 + p_{16,m}x_{2m}^3,$$

$$z_{2m} = p_{20,m} + p_{21,m}x_{1m} + p_{22,m}x_{2m} + p_{23,m}x_{1m}^2 + p_{24,m}x_{2m}^2 + p_{25,m}x_{1m}^3 + p_{26,m}x_{2m}^3,$$
(1)

или в векторно-матричной символьной форме:

$$\mathbf{Z}_m = \mathbf{P}_m \,\mathbf{W}(\mathbf{X}_m),\tag{2}$$

где $Z_m^{T} = [z_{1m} \ z_{2m}]$ — вектор средних по площади поля интегрированных параметров отражения в видимом диапазоне спектра 440–740 нм (z_1) и в инфракрасном диапазоне 740–1250 нм (z_2), %; $P_m = \begin{bmatrix} p_{01} \ p_{11} \ p_{12} \ p_{13} \ p_{14} \ p_{15} \ p_{16} \ p_{02} \ p_{21} \ p_{22} \ p_{23} \ p_{24} \ p_{25} \ p_{26} \end{bmatrix}_m$ — матрица параметров модели; $W(X_m) = \begin{bmatrix} 1 \ x_{1m} \ x_{2m} \ x_{1m}^2 \ x_{2m}^2 \ x_{1m}^3 \ x_{2m}^3 \end{bmatrix}$ — вектор-функция, где аргументами являются параметры состояния посева: x_{1m} — средняя по площади поля плотность биомассы посева (урожай), кг·м⁻², x_{2m} — средняя по площади поля плотность сырой массы посева, кг·м⁻².

Модель оптических измерений химического состояния биомассы посевов

Имеет такую же форму, как и модель (1), но размерность, определяемую числом параметров химического состояния и используемых спектральных диапазонов:

$$z_{1h} = p_{10} + p_{11}x_{1h} + p_{12}x_{2h} + p_{13}x_{3h} + p_{14}x_{1h}^2 + p_{15}x_{2h}^2 + p_{16}x_{3h}^2 + p_{17}x_{1h}^3 + p_{18}x_{2h}^3 + p_{19}x_{3h}^3,$$

$$z_{2h} = p_{20} + p_{21}x_{1h} + p_{22}x_{2h} + p_{23}x_{3h} + p_{24}x_{1h}^2 + p_{25}x_{2h}^2 + p_{26}x_{3h}^2 + p_{27}x_{1h}^3 + p_{28}x_{2h}^3 + p_{29}x_{3h}^3,$$

$$z_{3h} = p_{30} + p_{31}x_{1h} + p_{32}x_{2h} + p_{33}x_{3h} + p_{34}x_{1h}^2 + p_{35}x_{2h}^2 + p_{36}x_{3h}^2 + p_{37}x_{1h}^3 + p_{38}x_{2h}^3 + p_{39}x_{3h}^3,$$
(3)

или в символьной векторно-матричной форме:

$$Z_h = P_h W(X_h), \tag{4}$$

где $\mathbf{P}_{m} = \begin{bmatrix} p_{10} & p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} & p_{17} & p_{18} & p_{19} \\ p_{20} & p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} & p_{27} & p_{28} & p_{29} \\ p_{30} & p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} & p_{36} & p_{37} & p_{38} & p_{39} \end{bmatrix}_{m}$ — матрица параметров модели; $\mathbf{W}^{\mathrm{T}}(\mathbf{X}_{h}) = \begin{bmatrix} 1 & x_{1h} & x_{2h} & x_{3h} & x_{1h}^{2} & x_{2h}^{2} & x_{3h}^{2} & x_{1h}^{3} & x_{2h}^{3} & x_{3h}^{3} \end{bmatrix}$ — вектор-функция параметров хи-

 $W^{T}(X_{h}) = \begin{bmatrix} 1 & x_{1h} & x_{2h} & x_{3h} & x_{1h}^{2} & x_{2h}^{2} & x_{3h}^{3} & x_{1h}^{3} & x_{2h}^{3} & x_{3h}^{3} \end{bmatrix}$ — вектор-функция параметров химического состояния посева; z_{1h} , z_{2h} , z_{3h} — интегрированные параметры отражения в синем (440–485 нм), зелёном (500–565 нм) и красном (625–740 нм) каналах относительно параметров химического состояния биомассы растений, %; x_{1h} , x_{2h} , x_{3h} — соответственно содержание азота, калия и фосфора, г·кг⁻¹.

Модель динамики параметров состояния биомассы

Отражает эволюцию массовых показателей посева в суточном масштабе времени в зависимости от основных влияющих факторов (Михайленко, Курашвили, 2008):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1m} \\ \dot{x}_{2m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} x(t)_{1m} \\ x(t)_{2m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} v_{N}(t) \\ v_{K}(t) \\ v_{P}(t) \\ v_{4}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} f_{1}(t) \\ f_{2}(t) \\ f_{3}(t) \end{bmatrix}, \quad t \in (T_1, T_2).$$
(5)

В блоке параметров структуры биомассы состояниями являются: x_{1m} — средняя по площади поля плотность биомассы посева (урожай), кг·м⁻²; x_{2m} — средняя по площади поля плотность сырой массы посева, кг·м⁻²; внешними возмущениями в обоих блоках являются: f_1 — среднесуточная температура воздушной среды, °C; f_2 — среднесуточный уровень радиации, Вт·(м²·ч)⁻¹; f_3 — среднесуточная интенсивность осадков, мм; параметры химического состояния почвы: v_N — содержание азота в почве, г·кг⁻¹; v_K — содержание калия в почве, г·кг⁻¹; v_p — содержание фосфора в почве, г·кг⁻¹; v_4 — влагозапас в почве, мм; $t \in (T_1, T_2)$ время на интервале вегетации (T_1 , T_2), сут.

Модель (5) в канонической символьной векторно-матричной форме имеет следующий вид:

$$\mathbf{X}_{m} = \mathbf{A}_{m} \mathbf{X}_{m}(t) + \mathbf{B}_{m} \mathbf{V}(t) + \mathbf{C}_{m} \mathbf{F}(t),$$
(6)

в которой структура векторов и матриц соответствует развёрнутой форме (5).

Модель динамики параметров химического состояния и водозапаса почвы в суточном масштабе времени

Отражает эволюцию параметров химического состояния и водозапаса почвы в суточном масштабе времени в зависимости от основных влияющих факторов:

$$\dot{v}_{N} = a_{11}v_{N}(t) + a_{14}v_{4} + d_{N}(t) + c_{11}f_{3}(t) - m_{11}x_{1m}(t) - n_{11}x_{1h}(t),
\dot{v}_{K} = a_{22}v_{K}(t) + a_{24}v_{4} + d_{K}(t) + c_{23}f_{3}(t) - m_{21}x_{1m}(t) - n_{22}x_{2h}(t),
\dot{v}_{P} = a_{33}v_{P}(t) + a_{34}v_{4} + d_{P}(t) + c_{33}f_{3}(t) - m_{31}x_{1m}(t) - n_{33}x_{3h}(t),
\dot{v}_{4} = a_{44}v_{4}(t) + d_{w}(t) + c_{41}f_{1}(t) + c_{42}f_{2}(t) + f_{3}(t) - m_{41}x_{1m}(t) - m_{42}x_{2m}(t),$$
(7)

где $d_{\rm P}(t)$, $d_{\rm K}(t)$, $d_{\rm N}(t)$ — дозы внесения элементов питания соответственно фосфора P, калия K и азота N, кг·га⁻¹; $d_w(t)$ — норма полива, мм; $a_{11} - a_{33}$, $c_{11} - c_{42}$ — параметры модели, оцениваемые по экспериментальным данным; t — время, сут.

Каноническая векторно-матричная развёрнутая форма модели:

$$\begin{vmatrix} \dot{v}_{\mathrm{N}} \\ \dot{v}_{\mathrm{K}} \\ \dot{v}_{\mathrm{P}} \\ \dot{v}_{\mathrm{4}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & 0 & 0 & a_{14} \\ 0 & a_{22} & 0 & a_{24} \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{25} \\ 0 & 0 & 0 & a_{33} & a_{25} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} \end{vmatrix}_{hp} \begin{vmatrix} v_{\mathrm{N}} \\ v_{\mathrm{K}} \\ v_{\mathrm{P}} \\ v_{\mathrm{4}} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}_{m} \begin{vmatrix} d_{\mathrm{N}}(t) \\ d_{\mathrm{K}}(t) \\ d_{\mathrm{P}}(t) \\ d_{W}(t) \end{vmatrix} + \\ + \begin{vmatrix} 0 & 0 & c_{13} \\ 0 & 0 & c_{23} \\ 0 & 0 & c_{33} \\ c_{41} & c_{42} & 1 \end{vmatrix}_{ph} \begin{vmatrix} f_{1}(t) \\ f_{2}(t) \\ f_{3}(t) \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} m_{11} & 0 \\ m_{21} & 0 \\ m_{31} & 0 \\ m_{41} & m_{42} \end{vmatrix}_{ph} \begin{vmatrix} x_{1m}(t) \\ x_{2m}(t) \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} n_{11} & 0 & 0 \\ 0 & n_{22} & 0 \\ 0 & 0 & n_{33} \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_{1h}(t) \\ x_{2h}(t) \\ x_{3h}(t) \end{vmatrix},$$

компактная символьная форма модели:

$$\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{A}_{hp} \mathbf{V}(t) + \mathbf{B}_{hp} \mathbf{D}(t) + \mathbf{C}_{hp} \mathbf{F}(t) - \mathbf{M}_{hp} \mathbf{X}_{m}(t) - \mathbf{N}_{hp} \mathbf{X}_{h}(t).$$
(9)

Модель динамики параметров химического состояния биомассы посева

Определяет эволюцию химических параметров состояния растений посева в суточном времени на всем периоде вегетации в зависимости от влияющих факторов:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1h} \\ \dot{x}_{2h} \\ \dot{x}_{3h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix}_{hx} \begin{bmatrix} x_{1h} \\ x_{2h} \\ x_{3h} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{Nv}(t) + \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix}_{hx} \begin{bmatrix} v_N(t) \\ v_K(t) \\ v_P(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix}_{hx} f_2(t),$$
(10)

или в компактной символьной форме:

$$\dot{X}_{h} = A_{hx} X_{h}(t) + B_{hx} d_{Nv}(t) + M_{hx} V(t) + c_{hx} f_{2}(t).$$
(11)

Приведённая система моделей позволяет реализовать алгоритм оценивания параметров состояния всей системы «почва — посев» по наблюдаемым параметрам отражения от средств ДЗЗ. При этом размерность вектора измеряемых (наблюдаемых) величин составляет 5 и она меньше размерности полного вектора параметров состояния всей системы, равного 9. Однако современные технологии оценивания позволяют восстанавливать оценки непосредственно ненаблюдаемых параметров состояния многомерных систем (Казаков, 1987; Михайленко, 2011; Mikhailenko, 2013).

Общий алгоритм оценивания

Для оценивания параметров биомассы посева в момент времени *t* использовался метод оптимальной фильтрации (Казаков, 1987; Михайленко, 2011; Kalman, 1960; Mikhailenko, 2013):

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{X}}}_{m} &= \mathbf{A}_{m} \, \hat{\mathbf{X}}_{m}(t) + \mathbf{B}_{m} \, \hat{\mathbf{V}}(t) + \mathbf{C}_{m} \, \mathbf{F}(t) + \mathbf{R}_{m}(t) \mathbf{P} \frac{\partial \, \mathbf{W}(\hat{\mathbf{X}}_{m})}{\partial \, \hat{\mathbf{X}}_{m}} \mathbf{K}_{zm}^{-1}(\boldsymbol{Z}_{m}(t) - \mathbf{P}_{m} \, \mathbf{W}(\hat{\mathbf{X}}_{m}(t))), \\ \dot{\mathbf{R}}_{m} &= \mathbf{R}_{m}(t) \mathbf{A}_{m}^{\mathrm{T}} + \mathbf{A}_{m} \mathbf{R}_{m}(t) - \mathbf{R}_{m}(t) \frac{\partial \, \mathbf{W}^{\mathrm{T}}(\hat{\mathbf{X}}_{m})}{\partial \, \hat{\mathbf{X}}_{m}} \mathbf{K}_{zm}^{-1} \frac{\partial \, \mathbf{W}(\hat{\mathbf{X}}_{m})}{\partial \, \hat{\mathbf{X}}_{m}} \mathbf{R}_{m}(t), \\ \hat{\mathbf{X}}_{m}(0) &= \mathbf{X}_{m}(0), \quad \mathbf{R}(0) = \mathbf{K}_{m}, \end{aligned}$$
(12)

где К_{гт} — матрица ковариаций ошибок оптических измерений параметров биомассы посева, параметры которой оцениваются одновременно с параметрами модели (3); R_т — матрица ковариаций ошибок оценивания.

Такой же алгоритм использовался для оценивания параметров химического состояния биомассы посева в момент времени *t*:

$$\dot{\hat{X}}_{h} = A_{hx} \hat{X}_{h}(t) + B_{hx} d_{Nv}(t) + M_{hx} \hat{V}(t) + c_{hx} f_{2}(t) + R_{h} P_{h} \frac{\partial W^{T}(\hat{X}_{h})}{\partial \hat{X}_{h}} K_{zh}^{-1}(Z_{h}(t) - \hat{X}_{h}(t)),$$

$$\dot{R}_{h} = R_{h}(t) A_{hx}^{T} + A_{hx} R_{h}(t) - R_{h}(t) P_{h} \frac{\partial W^{T}(\hat{X}_{h})}{\partial \hat{X}_{h}} K_{hx}^{-1} \frac{\partial W(\hat{X}_{h})}{\partial \hat{X}_{h}} P_{h}^{T} R_{h}(t),$$

$$\hat{X}_{h}(0) = X_{h}(0), \quad R_{h}(0) = K_{hx},$$
(13)

где K_{zh} — матрица ковариаций ошибок оптических измерений параметров химического состояния биомассы посева, параметры которой оцениваются одновременно с параметрами модели (5); R_h — матрица ковариаций ошибок оценивания.

Параметры химического состояния почвы оцениваются по оценкам, полученным в алгоритмах (12), (13):

$$\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{A}_{hp} \mathbf{V}(t) + \mathbf{B}_{hp} \mathbf{D}(t) + \mathbf{C}_{hp} F(t) - \mathbf{M}_{hp} \hat{\mathbf{X}}_{m}(t) - \mathbf{N}_{hp} \hat{\mathbf{X}}_{h}(t), \quad \hat{\mathbf{V}}(t) = V(0).$$
(14)

Для оценки эффективности общего алгоритма оценивания используется обратная связь по оценкам параметров химического состояния биомассы посева. Так, посредством модели (4) строятся оценки параметров отражения для химического состояния биомассы посева и сравниваются с их реальными значениями, поступающими от системы ДЗЗ. Для этих целей вводится следующий критерий качества оценивания:

$$J(t) = \left(Z_h(t) - P_h W(\hat{X}_h) \right)^{\hat{T}} \left(Z_h(t) - P_h W(X_h) \right).$$
(15)

Текущее значение критерия (15) фиксируется как $J_t = J(t)$, после повторного прохождения всех шагов алгоритма получается новое значение критерия (15), которое фиксируется как $J_{t+1} = J(t)$. Если $J_t - J_{t+1} \le \delta$, то ОСТАНОВ, иначе итерации алгоритма повторяются вплоть до выполнения условия $J_t - J_{t+1} \le \delta$.

Сходимость всего алгоритма обеспечивается высоким качеством идентификации всех используемых математических моделей и устойчивостью замкнутых алгоритмов фильтрации (12), (13). В свою очередь, высокое качество идентификации обеспечивается периодичностью измерений всех входных и выходных переменных моделей, которые в силу больших размеров сельскохозяйственных полей осуществляются на специально выделенных тестовых площадках, засеянных такой же культурой, как и на основном поле, и различающихся между собой уровнями управляющих воздействий. За счёт таких измерений осуществляется постоянное уточнение параметров моделей (адаптация) и обеспечивается минимизация ошибок идентификации, что, в свою очередь, является условием устойчивости замкнутых алгоритмов фильтрации (12), (13).

Апробация моделей и алгоритмов

Для апробации полученных результатов использовались данные экспериментальных исследований, проводимых на опытных полях Меньковского филиала Агрофизического института и хозяйств «Ручьи» и «Приневское» Всеволожского района Ленинградской области. Кроме того, для идентификации динамических моделей параметров состояния посевов и почвенной среды использовались данные опытной системы мониторинга состояния посевов кормовых культур Ленинградской области, которая охватывала более 50 хозяйств региона и эксплуатировалась в течение десяти лет (2004–2014). В число кормовых культур входили многолетние и однолетние травы, идущие на приготовление корма молочному стаду. Для идентификации моделей оптических измерений состояния биомассы и химических параметров посевов кормовых культур в течение пяти лет (2013–2017) проводились исследования с использованием отечественных гиперспектрометров «Липтон», базирующихся на самолётах (Ан-30 и Ан-2), и переносного гиперспектрометров PSR+ Srectrora diameter (США). Все полученные экспериментальные данные были объединены в единую БД, обновляемую ежегодно по новым экспериментальным данным.

На *рис. 4, 5* (см. с. 109) представлены результаты идентификации математических моделей (3), (5) ДЗЗ для массовых и химических параметров посева многолетних трав по экспериментальным данным 2016, 2017 гг. (ЗАО «Приневское», Всеволожский район, Ленинградская область). Здесь по вертикальной оси отражены параметры отражения, а по горизонтальной оси проставлены номера экспериментальных точек с различным сочетанием массовых показателей и химических параметров биомассы посева. Это позволяет представить результаты идентификации многомерной модели на одном графике.

На *рис. 6* (см. с. 109) представлены реально измеренные параметры состояния и результаты идентификации модели (7) и оценивания массовых показателей посева многолетних трав по текущим данным ДЗЗ и метеопараметрам (Меньковский филиал АФИ, ЗАО «Приневское», Всеволожский район, Ленинградская область, 2015–2017). Объединение этих данных на одном графике позволяет сопоставить процессы идентификации и оценивания с реальными величинами. Очевидно, что и процесс идентификации модели (расчётные величины), и процедура оценивания устойчивы и согласованы между собой. Это является основным фактором устойчивости последующих процедур оценивания и сходимости всего алгоритма. При этом среднеквадратическая ошибка оценивания меньше расчётных значений на 20–25 %. Следует заметить, что оценки показателей биомассы строятся только по текущим данным ДЗЗ, а экспериментальные точки (реальные измерения) приведены на графике для расчёта реальных ошибок оценивания.

На *рис.* 7–9 (см. с. 110) представлены результаты идентификации модели (12) и оценивания отдельных химических параметров состояния биомассы посева многолетних трав (по данным системы мониторинга Ленинградской области, 2007–2016). Здесь проявляются такие же тенденции, как и для массовых показателей биомассы, а именно ошибки оценивания не превышают ошибок идентификации модели, хотя они формируются только по текущим данным ДЗЗ.

На *рис. 10* (см. с. 111) представлен основной результат функционирования всего комплекса — процесс построения оценок химических параметров почвы и её водозапаса. Они формируются на основе оценок массовых показателей и химических параметров почвы, текущих метеофакторах и произведённых технологических операциях. Здесь экспериментальные точки параметров нанесены для расчета фактических ошибок оценивания, которые укладываются в диапазон 10-15 %. Сходимость оценок достигалась за 3-4 итерации общего алгоритма.



Рис. 4. Результаты идентификации математических моделей ДЗЗ для массовых показателей посева многолетних трав. АОЗТ «Приневское», Всеволожский район Ленинградской области, 01.06.2017–28.06.2017



Рис. 5. Результаты идентификации математических моделей Д33 для химических параметров биомассы посева многолетних трав. АОЗТ «Приневское», Всеволожский район Ленинградской области, 01.06.2017—28.06.2017



Рис. 6. Результаты идентификации модели и оценивания массовых показателей посева многолетних трав. АОЗТ «Приневское», Всеволожский район Ленинградской области, 12.06.2016–23.06.2016



Рис. 7. Результаты идентификации модели и оценивания содержания азота в биомассе посева многолетних трав. По данным системы мониторинга Ленинградской области 2007–2016 гг.



Рис. 8. Результаты идентификации модели и оценивания содержания калия в биомассе посева многолетних трав. По данным системы мониторинга Ленинградской области 2007–2016 гг.



Рис. 9. Результаты идентификации модели и оценивания содержания фосфора в биомассе посева многолетних трав. По данным системы мониторинга Ленинградской области 2007–2016 гг.



Рис. 10. Результаты оценивания химических параметров почвы по данным ДЗЗ. АОЗТ «Приневское», Всеволожский район Ленинградской области, 01.06.2017–28.06.2017

Выводы

Предложена методика и программно-технические средства оценивания химических параметров почвы на основе наземных измерений и данных дистанционного зондирования Земли (Д33). Она базируется на комплексе математических моделей, включающем в себя модели оптических измерений средствами Д33, модель динамики массовых показателей посева, модель динамики химических параметров биомассы посева и модель динамики химических параметров биомассы посева и модель динамики химических параметров и водозапаса почвы. Основным ядром предложенной методики является общий алгоритм оценивания, предусматривающий последовательное оценивание массовых показателей посева, химических параметров посева и на их основе формирование оценок химических параметров и водозапаса почвы. Программно-технические средства оценивания включают в себя систему наземных измерителей метеопараметров и всех оценивания параметров состояния, размещённых на 10–15 специально выделенных на поле тестовых площадках по 25–30 м² каждая, а также на средствах Д33, базирующихся на беспилотном летательном аппарате. Информация, формируемая комплексом оценивания, может быть использована для принятия управляющих решений по дозам внесения минеральных удобрений и нормам поливов в системах точного земледелия.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-016-00008).

Литература

- 1. Казаков И.Е. Методы оптимизации стохастических систем. М.: Наука, 1987. 384 с.
- 2. Михайленко И. М. Управление системами точного земледелия. СПб: СПбГУ, 2005. 233 с.
- 3. *Михайленко И. М.* Основные задачи оценивания состояния посевов и почвенной среды по данным космического зондирования // Экологические системы и приборы. 2011. № 8. С. 17–25.
- 4. *Михайленко И. М., Курашвили А. Е.* Прогнозирование состояния травостоя в системе управления качеством кормов в молочном животноводстве // Вестник РСХА. 2008. № 2. С. 10–13.
- 5. Точное сельское хозяйство (Precision Agriculture): учебно-практ. пособие / под ред. Д. Шпаара, А.В. Захаренко, В.П. Якушева. СПб.: ВИЗР, 2009. 397 с.
- 6. *Akhtman Y., Golubeva E., Tutubalina O., Zimin M.* Application of hyperspectural images and ground data for precision farming // Geography, Environment, Sustainability. 2017. V. 10. No. 4. P. 117–128.
- Jaud M., Le Dantec N., Ammann J., Grandjean P., Constantin D., Akhtman Y., Barbieux K., Allemand P., Delacourt C., Merminod B. Direct Georeferencing of a Pushbroom, Lightweight Hyperspectral System for Mini-UAV Applications // Remote Sensing. 2018. No. 10(2). P. 204–219.

- 8. *Kalman R. E.* A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Trans. ASME J. Basic Engineering. 1960. No. 82. P. 35–45.
- 9. *Mikhailenko I. M.* 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.
- 10. *Quemada M., Gabriel J., Zarco-Tejada P.* Airborne hyperspectral images and ground-level optical sensors as assessment tools for maize nitrogen fertilization // Remote Sensing. 2014. No. 6. P. 2940–2962.
- 11. Zarco-Tejada P.J., Guillén-Climent M. L., Hernández-Clemente R., Catalina A., González M. R., Martín P. Estimating leaf carotenoid content in vineyards using high resolution hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) // Agricultural and Forest Meteorology. 2013. V. 171–172. P. 281–294.

Assessment of the chemical state of soil environment from remote sensing data of the Earth

I. M. Mikhaylenko, V. N. Timoshin

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

Managing parameters of the chemical state of the soil through the introduction of mineral fertilizers is the most important technological component in modern systems of precision farming. This problem has not been positively resolved so far. Here, a significant deterrent is the lack of methods and means for estimating the parameters of the chemical state over large areas of agricultural fields. The purpose of this study is to create a scientific and methodological basis for solving the problem of estimating the parameters of the chemical state of the soil based on Earth remote sensing data (ERS). Due to the inaccessibility of a soil chemical condition for remote sensing, the evaluation of its parameters is carried out in two stages. At the first stage, the mass and chemical parameters of the state of sowing of an agricultural crop are estimated, and at the second stage, estimates of the parameters of the chemical state of the soil are constructed from these estimates. The proposed method is based on mathematical models: parameters of the chemical state of the soil for individual crops. At the same time, an optimal filtering algorithm was used to build parameter estimates based on remote sensing data. The obtained estimates can be used to control the parameters of the chemical state of the soil in precision farming systems.

Keywords: precision farming, agrotechnology management, remote sensing of the Earth, mathematical models, algorithms for estimating parameters

Accepted: 12.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-102-113

References

- 1. Kazakov I. E. *Metody optimizatsii stokhasticheskikh sistem* (Methods of optimization of stochastic systems), Moscow: Nauka, 1987, 384 p.
- 2. Mikhaylenko I. M., *Upravleniye sistemami tochnogo zemledeliya* (Management of precision farming systems), St. Petersburg: SPbGU, 2005, 233 p.
- 3. Mikhaylenko I. M., Osnovnye zadachi otsenivaniya sostoyaniya posevov i pochvennoy sredy po dannym kosmicheskogo zondirovaniya (The main tasks of assessing the state of crops and soil environment from space probing data), *Ekologicheskiye sistemy i pribory*, 2011, No. 8, pp. 17–25.
- 4. Mikhaylenko I. M., Kurashvili A. E., Prognozirovanie sostoyaniya travostoya v sisteme upravleniya kachestvom kormov v molochnom zhivotnovodstve (Prediction of grass stand state in the feed quality management system in dairy cattle breeding), *Bulletin of the RSHA*, 2008, No. 2, pp. 10–13.
- 5. *Tochnoye sel'skoye khozyaystvo* (Precision Agriculture), D. Shpaar, A. V. Zakharenko, V. P. Yakushev (eds.), St. Petersburg: VIZR, 2009, 397 p.

- 6. Akhtman Y., Golubeva E., Tutubalina O., Zimin M., Application of hyperspectural images and ground data for precision farming, *Geography, Environment, Sustainability*, 2017, pp. 117–128.
- Jaud M., Le Dantec N., Ammann J., Grandjean P., Constantin D., Akhtman Y., Barbieux K., Allemand P., Delacourt C., Merminod B., Direct Georeferencing of a Pushbroom, Lightweight Hyperspectral System for Mini-UAV Applications, *Remote Sensing*, 2018, No. 10(2), pp. 204–219.
- 8. Kalman R. E., A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, *Trans. ASME J. Basic Engineering*, 1960, No. 82, pp. 35–45.
- 9. Mikhailenko I. M., 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.
- 10. Quemada M., Gabriel J., Zarco-Tejada P., Airborne hyperspectural images and ground-level optical sensors as assessment tools for maize nitrogen fertilization, *Remote Sensing*, 2014, No. 6, pp. 2940–2962.
- Zarco-Tejada P.J., Guillén-Climent M.L., Hernández-Clemente R., Catalina A., González M. R., Martín P., Estimating leaf carotenoid content in vineyards using high resolution hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV), *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, Vol. 171–172, pp. 281–294.