РАЗДЕЛ XV. СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО

Михайленко И.М.

Развитие методов и средств применения данных дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»
(Россия, Санкт-Петербург)

doi:10.18411/lj-08-2018-68

idsp: 000001:lj-08-2018-68

1. Простейшие методы анализа

Применение данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) начиналось с простейших приемов и методов, основанных на использовании различного рода критериев и индексов, представляющих собой комбинации параметров отражения в разных оптических каналах систем ДЗЗ. На настоящее время предложено более 160 различных индексов, среди которых можно выделить наиболее распространенный в настоящее время нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), концепция которого была представлена (Kriegler, 1969), а сам он был впервые описан (Rouse, 1973). Этот индекс был трансформирован в различные варианты, такие как относительный вегетационный индекс (RVI), впервые описанный (Jordan, 1969); разностный вегетационный индекс (DVI), впервые упоминается (Lillesand and Kiefer, 1987), а также инфракрасный вегетационный индекс, впервые описан (Crippen, 1990).

Использование индексов в основном связано с грубыми экспертными оценками ситуаций на полях и распознаванием образов с простыми дуальными альтернативами, таких как, наличие или отсутствие болезней растений, наличие стрессов различного характера, классификация земель, распознавание культур, обнаружение фенологических фаз развития культур; обобщенной оценкой состояния посевов типа «нормально – ненормально» и др. Посредством таких простейших методов не могут решаться проблемы управления в системах точного земледелия (ТЗ), где для достижения цели управления требуются надежные количественные оценки параметров состояния посевов и почвенной среды, определяющих эти цели. Кроме того, при таком упрощенном подходе не используют все возможности мультиспектральных измерений в системах ДЗЗ.

2. Оценивание параметров состояния посевов

Использование современных возможностей систем ДЗЗ для решения задач управления в ТЗ, прежде всего, связано с выбором целей управления и обоснованием целеобразующих параметров состояния посевов и выбором наиболее информативных каналов систем ДЗЗ для каждого из этих параметров. Поэтому для анализа информативности целесообразно применять классическую теорию информации (Шеннон, 1963). Согласно этой теории информативность оценивается приростом информации (или уменьшением энтропии) об исследуемом состоянии или явлении, получаемом после оптического измерения, по сравнению с априорной информацией о нем. При этом для определения объемов информации используются оценки априорных и апостериорных вероятностей. В качестве оценок вероятностей для оптических измерений примем числа попаданий значений k -го измерения в l -ю область для j -й области i -го состояния, отнесенное к общему числу пространственных точек измерения, в которых i -е состояние имело j -й уровень. Обозначим их как $p(y_{lk} | x_{ij}) = n_{lk} / n_{ij}$.

На основании оценок вероятностей состояний вычисляется априорная информация об i -ом измеряемом состоянии:

$$H_i^x = - \sum_{j_i=1}^{J_i} p(x_{ij}) \log p(x_{ij}). \quad (1)$$

Подобным образом с использованием соотношения Байеса вычисляется апостериорная информация, получаемая после измерений k-м каналом i-го состояния

$$H_{k,i}^y = \sum_{j_i}^{J_i} p(x_{ij}) \left[\sum_{l_k=1}^{L_k} p(y_{lk} | x_{ij}) \log p(y_{lk} | x_{ij}) \right]. \quad (2)$$

В качестве показателя информативности k-го канала по отношению к i-му состоянию используется относительное приращение информации, полученное после измерения

$$IN_{ki} = \frac{H_i^x - H_{ki}^y}{H_i^x} 100\%. \quad (3)$$

По этим показателям вычисляется показатель абсолютной информативности k-го канала по всем измеряемым состояниям

$$IN_k = \sum_{i=1}^I IN_{ki}. \quad (4)$$

Для удобства использования конкретных спектральных диапазонов и каналов в алгоритмах оценивания состояний системы «почва – растения – атмосфера» и распознавания счетных состояний все показатели информативности (3), (4) ранжируются по своей величине отдельно для каждого канала, и в состав измерительной системы включаются каналы, обладающие максимальной информативностью.

Современная информационная теория характеризует задачу оптимального оценивания, как процедуру восстановления информации о состоянии системы по косвенным наблюдениям. На рис. 1 представлена концептуальная схема задач оценивания состояния посевов и почвенного покрова по информации спутниковой системы ДДЗ. Выделим основные особенности решаемых задач. Во-первых, мы имеем дело с замкнутой системой «приземный слой атмосферы – растительный покров – почвенный покров». Все эти составляющие системы должны рассматриваться как единый комплекс, чем собственно и будет достигаться достаточная точность и надежность оценивания. Во-вторых, мы имеем два принципиально различных режима оценивания, в пределах тестового полигона, где мы располагаем дополнительными наземными измерениями, и в пределах всего обслуживаемого региона, где мы можем располагать только информацией системы ДДЗ (Михайленко и др., 2004; Михайленко, 2011).

Рис. 1. Концептуальная схема оценивания состояния посевов и почвенного покрова

На рис. 2 представлена информационно-алгоритмическая схема оценивания состояния посевов и почвенного покрова, имеющие универсальный характер, как для тестового полигона, так и для обслуживаемого региона. Из приведенной схемы видно, что оптимальное оценивание состояния посевов и почвенного покрова представляет собой специальные процедуры обработки апостериорной информации от средств ДДЗ и априорной информации, формируемой динамическими математическими моделями.

Рис. 2. Информационно-алгоритмическая схема оценивания состояния посевов и почвенного покрова

На рис. 3 выделены особенности процедуры оценивания в пределах тестового полигона или тестовых площадок (Михайленко и др., 2004). Здесь за счет периодических сопоставительных наземных измерений и данных ДДЗ идентифицируются (адаптируются) математические модели как измерителя ДДЗ, так и динамики состояния посевов и почвенной среды. Без наличия таких адаптируемых моделей реализация процедур оценивания невозможна, ни в пределах тестового полигона, ни на территории обслуживаемого региона.

Рис. 3. Особенности задач оценивания на тестовых полигонах

Рассмотрим процедуру оценивания на примере многолетних трав, состояние которых описывается динамической моделью (Михайленко, Курашвили, 2008; Михайленко и др., 2009)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1m} \\ \dot{x}_{2m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t)_{1m} \\ x(t)_{2m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \\ f_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \zeta_1(t) \\ \zeta_2(t) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$t \in (0, T), x_{1m}(0) = x_{1m,0}, x_{2m}(0) = x_{2m,0},$$

дополняемой моделью измерения

$$\begin{aligned} y_{1м}(t) &= p_1 e^{-p_2(x_1(t) + x_2(t))} + e_1(t), \\ y_{2м}(t) &= p_3 e^{-p_4 x_2(t)} + e_2(t). \end{aligned} \quad (6)$$

где: $x_{1м}$, $x_{2м}$ – сухая и сырая надземная масса растений, кг на заданной площади; f_1 – среднесуточная температура воздушной среды, °C; f_2 – среднесуточный уровень радиации, Вт (м²·час.)⁻¹; f_3 – среднесуточный уровень осадков, мм; $f_4 = t$ – время, косвенно учитывающее влияние влагосодержания почвы, сут.; $\zeta_1(t)$, $\zeta_2(t)$ – случайные помехи в модели, имеющие нулевое среднее и дисперсии d_1 , d_2 ; $y_{1м}$ – оптический показатель, полученный по первому каналу измерения (в видеодиапазоне); $y_{2м}$ – оптический показатель, полученный по второму каналу измерения (в инфракрасном диапазоне); p_1 – p_4 – параметры оптической системы измерений, оцениваемые по экспериментальным данным; $\varepsilon_1(t)$, $\varepsilon_2(t)$ – случайные помехи в модели зондирующего измерителя, имеющие нулевое среднее и дисперсии σ_1^2 , σ_2^2 .

Модели (5), (6) могут быть представлены в символьной векторно-матричной форме

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + CF(t) + \zeta(t), \\ Y_x &= F(X) + E(t), \end{aligned} \quad (7)$$

$$F(X) = \begin{bmatrix} p_1 e^{-p_2(x_1(t) + x_2(t))} \\ p_3 e^{-p_4 x_2(t)} \end{bmatrix},$$

$$X(0) = X_0,$$

$$M[E(t)] = 0, \text{cov}[E(t)] = S,$$

$$M[\zeta(t)] = 0, \text{cov}[\zeta(t)] = D.$$

Наличие моделей (7) позволяет одновременно использовать априорную информацию об измеряемом состоянии, формируемую динамической моделью, и апостериорную информацию измерителей, как это указано на рис. 2,3. Такое комплексирование достигается в динамических системах, называемыми оптимальными фильтрами (Казаков, 1987)

$$\begin{aligned} \dot{\hat{X}} &= A\hat{X} + CF(t) + R(t) \frac{\partial F^T(\hat{X})}{\partial \hat{X}} S^{-1} (Y_x(t) - F(\hat{X})) \\ \dot{R} &= D + R(t)A^T + AR(t) - R(t) \frac{\partial F^T(\hat{X})}{\partial \hat{X}} S^{-1} \frac{\partial F(\hat{X})}{\partial \hat{X}} R(t), \\ \hat{X}(0) &= M[X_0], R(0) = \text{cov}[X_0], \end{aligned} \quad (8)$$

$$S = \begin{bmatrix} s_1^2 & s_1 s_2 \\ s_1 s_2 & s_2^2 \end{bmatrix}.$$

На рис. 4 представлены результаты функционирования оптимального фильтра (8), который по измеренным оптическим показателям посева в красной и инфракрасной областях и реальным измерениям климатических факторов воспроизводит оценки

состояния биомассы посева многолетних трав без прямого его измерения. Здесь фигурными точками обозначено реальное состояние биомассы, а сплошными линиями оценки, состояния, формируемые оптимальным фильтром. Фильтр обеспечивает 2–3%-ю точность оценивания, что вполне достаточно для выработки технологических воздействий на посеве по информации дистанционных оптических измерителей.

Рис. 4. Процесс оптимального оценивания состояния посева по данным ДЗЗ

3. Оценивание параметров состояния почвы

Среди компонентов современного «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 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 является одной из центральных и положительно не решенных до настоящего времени проблем. Она обусловлена тем, что современные средства ДЗЗ не чувствительны к химическим параметрам почвы, так как они распределены по всему объему верхнего слоя почвы. Вместе с тем информация о химическом состоянии почвы очень 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. Для решения проблемы оценивания параметров химического состояния почвы можно использовать двухэтапную процедуру, когда на первом этапе по данным ДЗЗ сначала оценивают параметры состояния биомассы посева непосредственно перед уборкой урожая, а на втором этапе на основе модели связи с урожаем оценивают параметры самого химического состояния почвы (Михайленко, 2018). При всей видимой простоте такого подхода, следует иметь в виду, что в момент уборки урожая мы оцениваем не сами параметры химического состояния почвы, как факторы, влияющие на урожай, а только их остаточные значения на конец вегетационного периода. Это связано с тем, сами элементы питания выносятся с урожаем и осадками в течение всего вегетационного периода. Отсутствие информации об этих потерях вносит

существенную неопределенность, как в модели зависимости урожая от параметров химического состояния. Это заставляет переходить от конечных (терминальных) оценок к текущим (мониторинговым) оценкам, формируемым на всем интервале вегетации культуры. Такой переход возможен только при расширении числа оптических каналов ДЗЗ и математических моделей, на основе которых возможно формирование мониторинговых оценок. Так разработки новых мультиспектральных средств ДЗЗ позволяет получать оперативную информацию о параметрах химического состояния посевов, косвенно связанных с аналогичными почвенными параметрами (Akhtman et. al., 2017). Это приводит к необходимости введения динамической модели параметров химического состояния посевов и модели оптических измерений этих параметров. В свою очередь такие модели актуальны только при наличии динамической модели искомых параметров химического состояния почвы.

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

Модель оптических измерений состояния биомассы посевов (6), которую для удобства идентификации целесообразно преобразовать сначала в полиномиальную форму

$$\begin{aligned} z_{1m} &= p_{10,m} + p_{11,m}x_{1m} + p_{12,m}x_{2m} + p_{13,m}x_{1m}^2 + p_{14,m}x_{2m}^2 + p_{15,m}x_{1m}^3 + p_{16,m}x_{2m}^3, \\ z_{2m} &= p_{20,m} + p_{21,m}x_{1m} + p_{22,m}x_{2m} + p_{23,m}x_{1m}^2 + p_{24,m}x_{2m}^2 + p_{25,m}x_{1m}^3 + p_{26,m}x_{2m}^3, \end{aligned} \quad (9)$$

а затем в векторно-матричную символьную форму

$$Z_m = P_m W(X_m), \quad (10)$$

где: $Z_m^T = [z_{1m} \ z_{2m}]$ – вектор средних по площади поля параметров отражения в красном диапазоне (z_1) и в инфракрасном диапазоне (z_2);

$$P_m = \begin{bmatrix} p_{01} & p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} \\ p_{02} & p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} \end{bmatrix}_m - \text{матрица параметров модели,}$$

$W(X_m) = [1 \ x_{1m} \ x_{2m} \ x_{1m}^2 \ x_{2m}^2 \ x_{1m}^3 \ x_{2m}^3]$ – вектор-функция, где аргументами являются параметры состояния посева: x_{1m} – 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 в полиномиальной форме

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

или в символьной векторно-матричной форме

$$Z_h = P_h W(X_h), \quad (12)$$

$$\text{где: } P_h = \begin{bmatrix} p_{10} & p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} & p_{17} & p_{18} & p_{19} \\ p_{20} & p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} & p_{27} & p_{28} & p_{29} \\ p_{30} & p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} & p_{36} & p_{37} & p_{38} & p_{39} \end{bmatrix}_m - \text{матрица параметров модели; } W^T(X_h) = [1 \ x_{1h} \ x_{2h} \ x_{3h} \ x_{1h}^2 \ x_{2h}^2 \ x_{3h}^2 \ x_{1h}^3 \ x_{2h}^3 \ x_{3h}^3] - \text{вектор-функция}$$

параметров химического состояния посева; z_{1h} , z_{2h} , z_{3h} – параметры отражения в синем, видимом и красном каналах относительно параметров химического состояния биомассы растений: x_{1h} , x_{2h} , x_{3h} – соответственно, содержание азота, калия и фосфора.

Модель динамики параметров химического состояния и водозапаса почвы в скалярной форме (Михайленко, 2018)

$$\begin{aligned}\dot{v}_N &= a_{11}v_N(t) + a_{14}v_4 + d_N(t) + c_{11}f_3(t) - m_{11}x_{1m}(t) - n_{11}x_{1h}(t), \\ \dot{v}_K &= a_{22}v_K(t) + a_{24}v_4 + d_K(t) + c_{23}f_3(t) - m_{21}x_{1m}(t) - n_{22}x_{2h}(t), \\ \dot{v}_P &= a_{33}v_P(t) + a_{34}v_4 + d_P(t) + c_{33}f_3(t) - m_{31}x_{1m}(t) - n_{33}x_{3h}(t), \\ \dot{v}_4 &= a_{44}v_4(t) + d_w + c_{41}f_1(t) + c_{42}f_2(t) + f_3(t) - m_{41}x_{1m}(t) - m_{42}x_{2m}(t),\end{aligned}\quad (13)$$

где: $d_P(t)$, $d_K(t)$, $d_N(t)$, $d_w(t)$ – дозы внесения элементов питания, соответственно, фосфора P, калия K и азота N, кг га⁻¹ и норма полива d_w , мм; a_{11} – a_{33} , b_2 – b_3 , c_1 – c_3 – параметры модели, оцениваемые по экспериментальным данным; t – время, сут.

Каноническая векторно-матричная развернутая форма модели (13)

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{v}_N \\ \dot{v}_K \\ \dot{v}_P \\ \dot{v}_4 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & a_{14} \\ 0 & a_{22} & 0 & a_{24} \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{25} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} \end{bmatrix}_{hp} \begin{bmatrix} v_N \\ v_K \\ v_P \\ v_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} d_N(t) \\ d_K(t) \\ d_P(t) \\ d_w(t) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} \\ 0 & 0 & c_{23} \\ 0 & 0 & c_{33} \\ c_{41} & c_{42} & 1 \end{bmatrix}_{ph} \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_{11} & 0 \\ m_{21} & 0 \\ m_{31} & 0 \\ m_{41} & m_{42} \end{bmatrix}_{ph} \begin{bmatrix} x_{1m}(t) \\ x_{2m}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} n_{11} & 0 & 0 \\ 0 & n_{22} & 0 \\ 0 & 0 & n_{33} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1h}(t) \\ x_{2h}(t) \\ x_{3h}(t) \end{bmatrix},\end{aligned}\quad (14)$$

и компактная символьная форма модели

$$\dot{V} = A_{hp} V(t) + B_{hp} D(t) + C_{hp} F(t) - M_{hp} X_m(t) - N_{hp} X_h(t). \quad (15)$$

Модель динамики параметров химического состояния биомассы посева в векторно-матричной развернутой форме

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{x}_{1h} \\ \dot{x}_{2h} \\ \dot{x}_{3h} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix}_{hx} \begin{bmatrix} x_{1h} \\ x_{2h} \\ x_{3h} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} d_{Nv}(t) + \\ &+ \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix}_{hx} \begin{bmatrix} v_N(t) \\ v_K(t) \\ v_P(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix}_{hx} f_2(t),\end{aligned}\quad (16)$$

или в компактной символьной форме

$$\dot{X}_h = A_{hx} X_h(t) + B_{hx} d_{Nv}(t) + M_{hx} V(t) + c_{hx} f_2(t), \quad (17)$$

Приведенная 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 не измеряемых параметров состояния многомерных систем (Казаков, 1987).

Ввиду того, что параметры химического состояния почвы недоступны средствам ДЗЗ, то предлагается следующая итерационная схема их оценивания.

Шаг 1. Вводятся начальные условия оценивания:

- вектор параметров состояния биомассы посева $X_m(0)$;
- вектор параметров химического состояния посева $X_h(0)$;
- вектор параметров химического состояния почвы $V(0)$.

Шаг 2. Вводятся данные дистанционного зондирования в момент времени t :

- вектор наблюдаемых параметров отражения для состояния биомассы посева $Z_m(t)$;
- вектор наблюдаемых параметров отражения химического состояния посева $Z_h(t)$.

Шаг 3. Оцениваются параметры биомассы посева в момент времени t по алгоритму (8).

Шаг 4. Оцениваются параметры химического состояния биомассы посева в момент времени t :

$$\begin{aligned}\dot{\hat{X}}_h &= A_{hx} \hat{X}_h(t) + B_{hx} d_{Nv}(t) + M_{hx} \hat{V}(t) + c_{hx} f_2(t) + R_h K_{zh}^{-1} (Z_h(t) - \hat{X}_h(t)) \\ \dot{R}_h &= R_h(t) A_{hx}^T + A_{hx} R_h(t) - R_h(t) K_{hx}^{-1} R_h(t), \\ \hat{X}_h(0) &= X_h(0), R_h(0) = K_{hx},\end{aligned}\quad (18)$$

где: R_h – матрица ковариаций ошибок оценивания.

Шаг 5. На основе оценок $\hat{X}_m(t)$ и $\hat{X}_h(t)$ формируются оценки параметров химического состояния и водозапаса почвы:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{V}} &= A_{hp} V(t) + B_{hp} D(t) + C_{hp} F(t) - M_{hp} \hat{X}_m(t) - N_{hp} \hat{X}_h(t), \\ \hat{V}(t) &= V(0).\end{aligned}\quad (19)$$

Шаг 6. Вычисляется критерий качества оценивания

$$J(t) = (Z_h(t) - P_h W(\hat{X}_h))^T (Z_h(t) - P_h W(\hat{X}_h)). \quad (20)$$

Если $J(t) \leq \delta$, то ОСТАНОВ, иначе перейти к шагу 3.

В связи с тем, что параметры химического состояния почвы непосредственно не измеряются, то приведенный алгоритм их оценивания не имеет обратной связи по оценкам, т. е. он не замкнут. Поэтому для управления общим алгоритмом оценивания замыкание осуществляется по измеряемым параметрам химического состояния посева.

На рис. 5 представлены результаты идентификации модели ДЗЗ параметров химического состояния биомассы посева (12), являющейся ключевой в общей схеме оценивания. Здесь ошибки идентификации укладываются в допуск $\pm 10\%$, что достаточно для получения надежных оценок химических параметров почвы и ее водозапаса, которые представлены на рис. 6. Эти оценки формируются на основе оценок массовых показателей посева и химических параметров почвы, текущих значений метеофакторов и произведенных технологических операций. Здесь экспериментальные точки параметров нанесены для расчета фактических ошибок оценивания, которые укладываются в диапазон 10–15%.

Рис. 5. Результаты идентификации математической модели ДЗЗ для химических параметров биомассы посева многолетних трав

Рис. 6. Результаты оценивания химических параметров почвы по данным ДЗЗ

4. Управление состоянием посевов

Оценки параметров состояния посевов и почвенной среды служат информационной основой для формирования управлений параметрами агротехнологий в ТЗ. При этом наличие управляющих воздействий с существенно различающейся временной реакцией на них посевов приводят к необходимости организации нескольких уровней управления, согласованных между собой, как по параметрам состояния, так и по достижимым целям управления и критериям оптимальности (Михайленко, 2017). На самом верхнем уровне, который можно назвать стратегическим, должно находиться управление, реакция на которое проявляется в течение нескольких сельскохозяйственных сезонов. Наличие такого уровня позволит более строго обосновывать дозы внесения удобрений и

мелиорантов пролонгированного действия и тем самым исключать провалы урожайности при смене культур в севооборотах, а также перерасход удобрений и стабилизировать почвенной плодородие в течение длительного времени. Следующий иерархический уровень управления реализуется на отдельном периоде вегетации и предусматривает технологическое воздействие с реакцией в суточном масштабе времени. При этом необходимо отметить, что сочетание больших размеров поля и значительный общий расход ресурсов, затрачиваемых при реализации технологий, при существенно ограниченной мощности оперативного воздействия со стороны технологических машин, приводят к необходимости предварительного определения расхода каждого используемого технологического ресурса в течение одного сельскохозяйственного года. В этом собственно и заключается вторая ступень или этап общей задачи технологического управления. Первые две верхние ступени управления являются программными или планирующими, т.е. показывают, каким образом количественно оценить и применить ресурс управления агротехнологиями. Поэтому по принятой международной терминологии их можно назвать этапы **off-line 1** и **off-line 2**.

Для реализации технологического управления в реальном времени нам необходимо ввести его третью ступень **on-line**, призванное одновременно воспроизвести основное ресурсное управление и скомпенсировать пространственную неоднородность поля и временную неопределенность. Здесь уже требуется информация о реальных локальных отклонениях параметров состояния ОУ от оптимальных программ, которые были обоснованы на верхних уровнях управления.

На рис. 7 представлена диаграмма реализации одного из видов стратегического управления агротехнологией в виде последовательности внесения доз мелиоранта по годам севооборота (**off-line 1**). Реализация такой стратегии позволяет минимизировать средние риск потерь урожая за счет поддержания оптимального уровня кислотности почвы. Для реализации этого уровня управления необходимо по данным ДЗЗ оценить параметры химического состояния почвы в момент уборки урожая (Михайленко, 2017).

Рис. 7. Оптимальная стратегия внесения мелиоранта по годам севооборота

В таблице приведены параметры программы оптимального управления поливами и подкормками азотными удобрениями посева многолетних трав. На рис. 8 представлены программы изменения состояния почвенной среды, как фактора управления, при оптимальном управлении подкормками и поливами, а на рис. 9 – программы потенциального и оптимального развития посева по биомассе (общая и сухая биомасса). На данном уровне управления обеспечивается достижение заданного

уровня урожайности посева многолетних трав на одном межкусовом периоде, а именно, максимальное приближение программы развития посева к потенциальному уровню. Для реализации данного уровня управления требуются оценки начального состояния посева, формируемые по данным ДЗЗ в момент прорастания.

Таблица

Оптимальные дозы азотных подкормок и норм поливов при программном управлении

Даты проведения	Дозы подкормок, кг га ⁻¹	Нормы поливов, т га ⁻¹
05.06.2009	67,0	31,5
18.06.2009	0	258,1
01.07.2009	0	260,0

Рис. 8. Программы изменения состояния почвенной среды при оптимальном управлении подкормками поливами

Рис. 9. Программы потенциального и оптимального развития посева по биомассе (общая и сухая биомасса)

На рис. 10 представлено пространственное распределение оценок общей биомассы посева многолетних трав в момент реализации управления **on-line**. Эти оценки формируются по данным ДЗЗ в моменты проведения поливов и подкормок.

Рис. 10. Оценки распределения по площади поля биомассы посева многолетних трав на момент формирования управления

На рис. 11, 12 представлены распределения норм поливов и доз удобрений в подкормках на фрагменте площади сельскохозяйственного поля, обеспечивающих воспроизводство оптимальных программ управления в реальном времени и достижения общей цели управления.

Рис. 11. Распределение по площади поля доз внесения азотных удобрений на элементарных участках посева многолетних трав

Рис. 12. Распределение по площади поля норм полива на элементарных участках посева многолетних трав

Выводы

Развитие современных методов применения средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в сельском хозяйстве ориентировано на переход от простейших методов оценки состояния сельскохозяйственных угодий к классическим процедурам оптимального оценивания параметров состояния посевов и почвенной среды. Такой переход подразумевает замену скалярных индексов многокомпонентными оценками параметров, отражающих цели задач управления состоянием посевов и почвенной среды. Этот переход невозможен без создания адекватных математических моделей, как самих средств ДЗЗ, так и динамики параметров состояния посевов и почвенной среды. При этом процедура ДЗЗ рассматривается как косвенное измерение параметров состояния посевов и является источником апостериорной информации об этих параметрах. В свою очередь модели динамики параметров состояния посевов и почвенной среды, учитывающие основные факторы, влияющие на эти параметры, являются источником априорной информации о состоянии. Согласно классическому информационному подходу, процедура оценивания заключается в комплексировании источников априорной и апостериорной информации. Такое комплексирование осуществляется в алгоритмах оптимальной фильтрации, где оценки параметров состояния посевов и почвенной среды формируются с каждым актом получения данных ДЗЗ. Надежность получаемых оценок обеспечивается периодическими сопоставимыми измерениями параметров состояния посевов, почвенной среды и оптических параметров отражения в каналах системы ДЗЗ на тестовых площадках, выделяемых на сельскохозяйственных полях с разными культурами.

**Статья подготовлена по результатам работы выполненной при частичной поддержке фонда РФФИ по проекту № 18-016-00008*

1. Михайленко И. М. Основные задачи оценивания состояния посевов и почвенной среды по данным космического зондирования // Экологические системы и приборы. 2011. № 8. С. 17–25.
2. Михайленко И. М. Теоретические основы и техническая реализация управления агротехнологиями. СПб.: СПбГТУ, 2017. 250 с.
3. Михайленко И. М., Курашвили А. Е. Прогнозирование состояния травостоя в системе управления качеством кормов в молочном животноводстве // Вестник РСХА. 2008. № 2. С. 10–13.

4. Михайленко И. М., Тимошин В. Н. Управление химическим состоянием почв на основе данных дистанционного зондирования Земли // Таврический вестник аграрной науки. 2018. № 1(13). С. 63–74.
5. Михайленко И. М., Тимошин В. Н., Данилова Т. Н. Математическое моделирование системы «почва – растение – атмосфера» на примере многолетних трав // Доклады российской академии сельскохозяйственных наук. 2009. № 4. С. 61–64.
6. Михайленко И. М., Якушев В. П., Полуэктов Р. А. «Агромониторинг»: структура, функции, реализация // Доклады РАСХН. 2004. № 3. С. 66–68.
7. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Иностранная литература, 1963. 295 с.
8. Akhtman Y., Golubeva E., Tutubalina O., Zimin M. Application of hyperspectral images and ground data for precision farming// Geography, environment, sustainability. Vol. 10. No. 4(2017). P. 117–128.
9. Crippen R. E. Calculating the Vegetation Index Faster // Remote Sensing of Environment. 1990. Vol. 34. P. 71–73.
10. Kriegler F. J., Malila W. A., Nalepka R. F., and Richardson W. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition, in Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment University of Michigan. 1969, Ann Arbor. MI. P. 97–131.
11. Lillesand T. M., Kiefer R. W. Remote Sensing and Image Interpretation, 2nd edition, John Wiley and Sons. 1987. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore. 721 p.
12. Jordan C. F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. Ecology. 1969. Vol. 50. P. 663–666.
13. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., and Deering D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351.1973. Vol. 1. P. 309–317.