

Математическое моделирование процессов в агропромышленном комплексе и проблемы управления

УДК 551.524.37; 632.111.51; 632.111.52

КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКРЫТЫХ ЗАМОРОЗКОВ

И. М. Михайленко, В. Н. Тимошин

*ГНУ Агрофизический научно-исследовательский институт Россельхозакадемии,
Гражданский пр., 14, Санкт-Петербург, 195220*

Поступила в редакцию 16 мая 2014 г., принята к печати 05 июня 2014 г.

Представлена методика и разработанный на ее основе программно-технический комплекс прогнозирования скрытых заморозков на сельскохозяйственных угодьях. Рассмотрены все виды возможных заморозков, которые в разработанной методике представляются, как образы или классы, подлежащие распознаванию по прогнозной информации о метеофакторах, за счет которых возникают указанные климатические явления.

Ключевые слова: скрытые заморозки, компьютерные программы, прогноз.

ВВЕДЕНИЕ

Скрытыми заморозками являются неблагоприятные климатические явления, возникающие на фоне устойчивой положительной среднесуточной температуры приземного слоя атмосферы. Возникая поздней весной заморозки, повреждают посевы, что неизбежно влечет за собой потери урожая и качества сельскохозяйственной продукции. Повторяющиеся осенние и поздние весенние заморозки сокращают длительность вегетационного периода для теплолюбивых культур.

При помощи систематических наблюдений установлено (Берлянд, 1960; Гольцберг, 1961; Кононенко, 2013), что скрытые заморозки, как правило, радиационного типа повторяются ежегодно в весенний и осенний сезоны. Они возникают вследствие охлаждения земной поверхности излучением, чему содействуют все факторы, усиливающие излучение, среди которых наиболее существенным является безоблачное небо, особенно в ночное время. Появление низких форм облачности быстро ослабевает излучение земли, опасность возникновения заморозка уменьшается. Кроме того, существенным условием возникновения и существования заморозка является безветрие. Во время заморозка охлаждается только приземный слой воздуха небольшой толщины. Над ним располагаются слои воздуха с более высокой температурой, поэтому даже небольшой ветер приводит к тому, что приземные более холодные слои перемешиваются с более теплыми слоями, и заморозок, а также возможность его возникновения исчезает. Возник-

новение заморозка в большой степени зависит от влажности воздуха. Если при понижении температуры воздух окажется насыщенным водяными парами и будет достигнута точка росы, то дальнейшее падение температуры существенно замедлится. Точка росы показывает, до какого уровня может беспрепятственно снижаться температура приземного слоя воздуха.

Таким, образом, для возникновения радиационного заморозка необходимыми условиями являются: безоблачное небо ночью и сильное излучение; отсутствие ветра, штиль, при котором охлажденные приземные слои не перемешиваются с расположенными выше более теплыми слоями воздуха; низкая влажность воздуха и точка росы ниже нуля.

Адвективные и адвективно-радиационные заморозки образуются от притока холодных воздушных масс с севера или северо-востока. Оно захватывает толстый слой атмосферы до значительной высоты и сопровождается ростом давления воздуха, постепенным уменьшением облачности и температура воздуха. При этом, ветер имеет значительную скорость и к вечеру не ослабевает, направление ветра сохраняется постоянным с севера или с северо-востока. О предстоящем вторжении холодных масс воздуха и возможности адвективного заморозка лучше всего можно судить по синоптическим картам погоды. Однако, как было указано выше, безоблачная погода немедленно вызывает усиленное излучение земли и появление радиационного заморозка. Поэтому можно сказать, что в чистом виде адвектив-

ные заморозки не наблюдаются. Они усиливаются излучением и переходят в адвективно-радиационные. Следовательно, для правильного суждения о возможности возникновения заморозка нужно наблюдать: облачность, скорость и направление ветра, а также определять температуру, точки росы и давление воздуха.

Для своевременного предупреждения сельскохозяйственных организаций, садоводов и огородников о возможных заморозках необходимо оценивать вероятность наступления заморозка с интервалом упреждения не менее 24 часов. Поэтому разработка современной теории оценивания вероятности возникновения заморозков является актуальной проблемой, имеющей существенное народнохозяйственное значение, так как своевременное принятие мер для защиты сельскохозяйственных культур от заморозков может уменьшить потери, наносимые этим опасным явлением. В настоящей работе для решения данной проблемы используется теория адаптивной фильтрации и методика распознавания образов. Такое сочетание методов является достаточно эффективным средством надежного краткосрочного прогнозирования, осуществляемого по оперативным наблюдениям климатических факторов возникновения радиационных заморозков.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Как было отмечено во введении, при определенном сочетании климатических факторов на поверхности сельскохозяйственного посева может возникать радиационный или адвективно-радиационный заморозок. При этом сам факт появления заморозка является случайным событием, которое обнаруживается садоводами, огородниками и сельскими товаропроизводителями на своих полях и посевах. Для обнаружения и прогнозирования этого явления применим методологию распознавания образов. При этом информация о реальных заморозках, фиксируемых метеостанциями, может использоваться для адаптации моделей обнаружения или решающих правил, что суще-

ственно повысит надежность прогнозов появления заморозков, когда эти правила используют только прогнозную информацию. Обозначим событие «радиационный заморозок» – $S = 11$, а его отсутствие – $S = 12$, событие «адвективный заморозок» – $S = 21$, а его отсутствие – $S = 22$, событие «адвективно-радиационный заморозок» – $S = 31$, а его отсутствие – $S = 32$.

Для каждого из указанных случайных событий введем векторы определяющих климатических параметров (факторов):

$S = 11$ и $S = 12$ – $Z_1^T = [z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4]_1$,
 z_1 – температура приземного слоя воздуха, °C;
 z_2 – облачность неба, %; z_3 – влажность воздуха, % или точка росы, °C; z_4 – излучение земли, Вт/м²;

$S = 21$ и $S = 22$ – $Z_2^T = [z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4]_2$,
 z_1 – температура приземного слоя воздуха, °C; z_2 – скорость ветра, м/с; z_3 – направление ветра (азимут), угловые градусы, °C; z_4 – атмосферное давление воздуха, Па;

$S = 31$ и $S = 32$ –
 $Z_3^T = [z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4 \ z_5 \ z_6 \ z_7]_3$, z_1 – температура приземного слоя воздуха, °C; z_2 – облачность неба, %; z_3 – влажность воздуха, % или точка росы, °C; z_4 – излучение земли, Вт/м²; z_5 – скорость ветра, м/с; z_6 – направление ветра (азимут), угловые градусы, °C; z_7 – атмосферное давление воздуха, Па.

По установленным климатическим факторам, обозначаемые векторами Z_{ij} , определим условные совместные плотности этих факторов для каждой пары из вышеуказанных событий $f(Z_{1j}|S_{1j})$ и $f(Z_{2j}|S_{2j})$, $j = 1, 2, 3$ априорные вероятности появления заморозков, или, как принято в теории распознавания, классов p_{1j} и p_{2j} . Тогда решающее правило определения класса по текущим измерениям вектора факторов Z_j будет иметь следующий вид:

$$\hat{s} = 1j(\text{заморозок}), \text{ при } \frac{f(Z_{1j}|S_{1j})}{f(Z_{2j}|S_{2j})} \geq \frac{p_{2j}}{p_{1j}}, \quad (1)$$

$$\hat{s} = 2j(\text{отсутствие заморозка}), \text{ при } \frac{f(Z_{1j}|S_{1j})}{f(Z_{2j}|S_{2j})} < \frac{p_{2j}}{p_{1j}}.$$

Принимая гипотезу о нормальном распределении, по результатам обработки априорной информации о фактических замороз-

ках оценим параметры условных плотностей для всех пар классов:

$$f(Z_{ij}|S_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi^r |K_{ij}|}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(Z_{ij} - m_{ij})^T K_{ij}^{-1}(Z_{ij} - m_{ij})\right\}, \quad i = 1, 2; \quad j = 1, 2, 3; \quad (2)$$

где: m_{ij} , K_{ij} – вектор и ковариационная матрица метеофакторов для каждого из классов.

Обозначая отношение правдоподобия

$$\theta(z) = \frac{f(Z_{1j}|S_{1j})}{f(Z_{2j}|S_{2j})}, \quad (3)$$

и беря его удвоенный логарифм, получим решающую функцию обнаружения заморозков в следующем виде (Де Гроот, 1974):

$$\theta(Z_j) = Z_j^T (K_{2j}^{-1} - K_{1j}^{-1})Z_j + 2(m_{1j}^T K_{1j}^{-1} - m_{2j}^T K_{2j}^{-1})Z_j, \quad j = 1, 2, 3. \quad (4)$$

Пороговое значение решающей функции определяется следующим образом:

$$c_j = \theta\left(\frac{p_{2j}}{p_{1j}}\right) = 2 \ln \frac{p_{2j}}{p_{1j}} + \ln \frac{|K_{1j}|}{|K_{2j}|} + m_{1j}^T K_{1j}^{-1} m_{1j} - m_{2j}^T K_{2j}^{-1} m_{2j}, \quad (5)$$

где $|K_{ij}|$ – нормы матриц ковариаций климатических факторов классов.

При этом решающее правило (1) выглядит следующим образом

$$\hat{s}_j = 1 \text{ при } \theta(Z_j) \geq c_j, \quad (6)$$

$$\hat{s}_j = 2 \text{ при } \theta(Z_j) < c_j,$$

которое должно дополняться определителем вида заморозка, т. е. выбором j -пары

если $z_{12} \leq \delta_1$ и $z_{35} \leq \delta_2$, то S = 11 – радиационный заморозок;

если $z_{12} \geq \delta_3$ и $z_{35} \geq \delta_4$, то S=12 – адвективный заморозок;

если $\delta_1 \leq z_{12} \leq \delta_3$ и $\delta_2 \leq z_{35} \leq \delta_4$, то S=13 – смешанный адвективно-радиационный заморозок.

Возможен и другой, более простой вариант алгоритма распознавания заморозков, основанный на использовании линейных дискриминантных функций вида (Миленький, 1975)

$$\varphi_j(Z) = B_j^T Z, \quad (7)$$

а решающее правило выглядит следующим образом:

$$\hat{s}_j = 1 \text{ при } \varphi_j(Z) \geq 0, \quad (8)$$

$$\hat{s}_j = 2 \text{ при } \varphi_j(Z) < 0.$$

Для перехода к режиму прогнозирования нам необходимо ввести в рассмотрение динамические модели изменения температуры воздуха и почвы, которые для удобства использования алгоритмов адаптации примем в одинаковой форме

$$y(t) = p_1 + p_2 t + p_3 t^2 + p_4 t^3 + \zeta(t), \quad (9)$$

или в векторно-матричной форме

$$y(t) = \Phi^T[t]P[t] + \zeta[t], \quad (10)$$

где: $\zeta(t)$ – ошибка моделирования, представляющая центрированный случайный гауссовый процесс с нулевым средним и дисперсией d_ζ , $\Phi^T = [1 \quad t \quad t^2 \quad t^3]$ – матрица-строка базовых функций времени, $P^T = [p_1 \quad p_2 \quad p_3 \quad p_4]$ – вектор оцениваемых параметров модели.

Алгоритм адаптивного прогнозирования изменения температуры по модели процесса (8) имеет вид адаптивного фильтра (Эйкхофф, 1980)

уточнение вектора поправочных коэффициентов

$$K[t] = R[t]\Phi[t](\Phi^T[t]R[t]\Phi[t] + d_\zeta)^{-1}, \quad (11)$$

уточнение вектора параметров модели (8)

$$\hat{P}[t+1] = \hat{P}[t] + K[t](y[t] - \Phi^T[t]\hat{P}[t]), \quad (12)$$

уточнение матрицы ковариаций ошибок оценивания вектора параметров

$$R[t+1] = R[t] + R[t]\Phi[t] \\ (\Phi^T[t]R[t]\Phi[t] + d_{\zeta})^{-1}\Phi^T[t], \quad (13)$$

прогнозирование температуры воздуха и почвы по моделям одного вида, отличающимися параметрами, на интервал τ , начиная с момента t

$$y(\tau) = \Phi^T[\tau]\hat{P}[t], \quad (14)$$

Размерности векторов и матриц в алгоритме (10)–(13): $\hat{P}[t] - [4 \times 1]$, $K[t] - [4 \times 1]$, $\Phi^T[t] - [1 \times 4]$, $R[t] - [4 \times 4]$.

На основании приведенных положений общий алгоритм решения задачи выглядит следующим образом:

Шаг 0. За период наблюдений, предшествующий интервалу прогнозирования, по реальным данным о заморозках и климатических факторах оцениваются априорные параметры m_{sj} , K_{sj} – вектор и ковариационная матрица метеофакторов для каждого из классов, а также априорные вероятности их появления p_{sj} . По данным параметрам по (5) вычисляют пороговое число решающего правила (6). При этом каждый месяц возможного появления заморозков имеет свои априорные параметры распределения.

Шаг 1. Начиная с первого момента интервала прогнозирования $t = 1$, посредством моделей (14) прогнозируют до конца интервала все компоненты вектора климатических факторов заморозков.

Шаг 2. По результатам прогнозирования формируют вектор климатических факторов Z и вычисляют текущие значения решающей функции (4).

Шаг 3. Посредством правила (6) формируют решения по прогнозированию заморозков, вплоть до окончания суточного интервала времени.

Шаг 4. При наступлении новых суток, все шаги пп. 0–3 алгоритма повторяются.

При использовании решающего правила (8) на основе линейной дискриминантной функции, изменяется начальный шаг алгоритма, когда за период наблюдений, предшествующий интервалу прогнозирования, по реальным данным о заморозках и климати-

ческих факторах оцениваются матрицы параметров B_j .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Приемлемая для хозяйственных целей точность прогнозирования определяется двумя основными факторами – надежностью алгоритмов распознавания заморозков по климатическим параметрам и выбором базовых моделей самих климатических параметров в сочетании с эффективностью алгоритма адаптации их параметров по оперативным данным метеостанций.

Надежность алгоритмов распознавания легко проверяется по данным о фактических заморозках. Для этого на месячном интервале времени (по данным метеостанции «Белогорка», 2012 г.) были оценены априорные параметры m_{sj} , K_{sj} – вектор и ковариационная матрица метеофакторов для каждого вида заморозков, по которым было вычислено пороговое число решающего правила (6). По этим же данным были оценены матрицы параметров B_j линейного решающего правила (8). Проверка алгоритмов была проведена на суточном интервале времени, на котором фактически были зафиксированы все три вида заморозков. Информация о метеофакторах на этом интервале времени «предъявлялась» каждому из вариантов алгоритмов распознавания, полученные оценки сравнивались с фактическими видами заморозков. Каждый из вариантов алгоритма распознавания показал 100%-ную надежность обнаружения и отсутствия заморозков, что не требует графической иллюстрации их работы.

Для проверки точности алгоритма адаптации моделей прогнозирования информация о климатических параметрах последовательно вводилась в алгоритм (11)–(14). На рис. 1–3 представлены графики изменения среднеквадратического отклонения (СКО) фактических ошибок прогнозирования для первых трех климатических параметров на части суточного интервала времени, содержащего заморозки. Из этих графиков видно, что при существенном различии в форме процессов адаптации, очевидна тенденция их сходимости, что собственно и необходимо для обеспечения достаточной надежности прогнозирования. Это подтверждается графиками рис. 4, 5 изменения частотной оценки апостериорной вероятности правильного

обнаружения заморозков по прогнозной климатической информации методом оптимальных статистических решений и линейных решающих правил. Оба используемых метода позволяют выйти на удовлетворительный уровень надежности обнаружения заморозка «вообще» (более 50%) за два–три шага адаптации прогнозирующих моделей. В тоже время на обнаружение частных видов заморозков затрачивается больше половины интервала наблюдения. По данным апробации пока трудно отдать предпочтение како-

му-либо методу, для этого требуется большое число испытаний. Однако, оба метода в сочетании с алгоритмами адаптации прогнозирующих моделей показали свою работоспособность в пределах суточного интервала прогнозирования. Дальнейшее повышение надежности прогнозирования заморозков возможно за счет оптимизации структур моделей отдельных климатических факторов, при использовании одного и того же алгоритма их адаптации.

SKO1 температуры воздуха

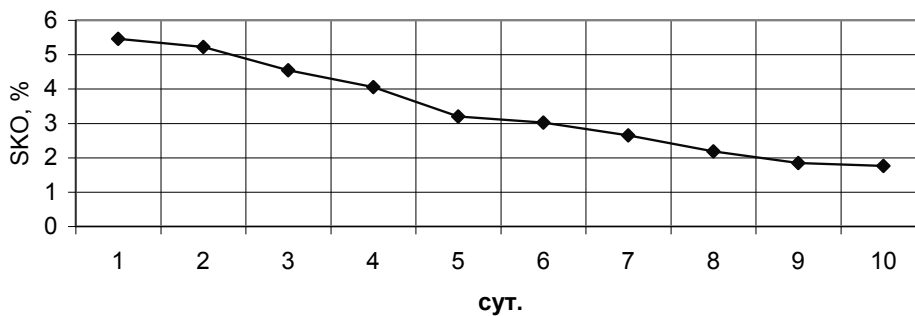


Рис. 1. Динамика процесса адаптации модели температуры приземного слоя атмосферы

SKO облачности небесной сферы

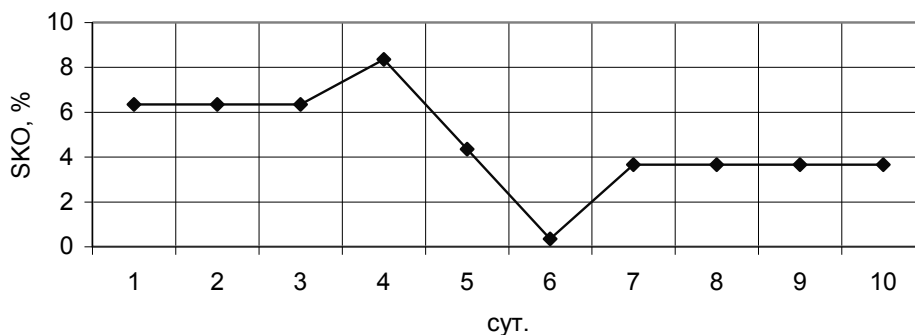


Рис. 2. Динамика процесса адаптации модели облачности небесной сферы

SKO влажности приземного слоя атмосферы

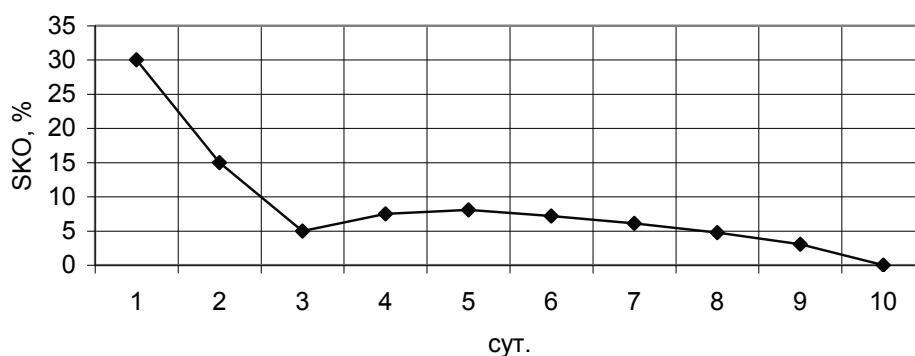


Рис. 3. Динамика процесса адаптации модели относительной влажности приземного слоя атмосферы

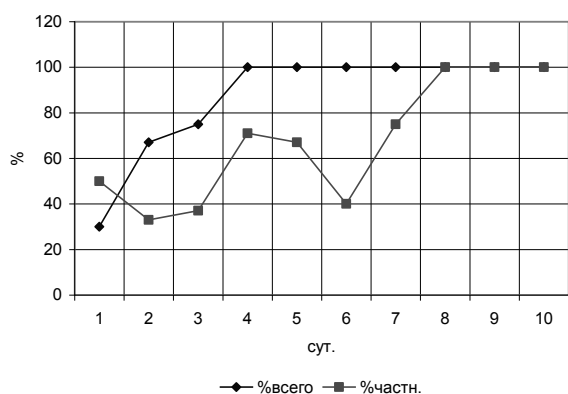


Рис. 4. Динамика частотной оценки апостериорной вероятности правильного обнаружения заморозков методом оптимальных статистических решений

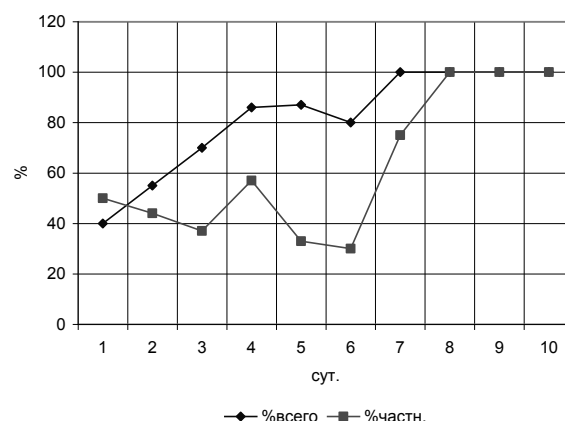


Рис. 5. Динамика частотной оценки апостериорной вероятности правильного обнаружения заморозков методом линейных решающих правил

Наличие прогнозной информации о заморозках позволит садоводам и огородникам подготовиться к борьбе с ними, а предсказание типа заморозка – выбрать конкретный вид защиты. Так для борьбы с радиационным заморозком применимо задымление, а для смешанных заморозков – применение вентиляторов для перемещения воздушных слоев или непрерывное дождевание. Полив огорода с вечера, значительно повышает шансы растений не погибнуть до утра. При поливе необходимо следить, чтобы вода как можно меньше попадала на растения, – им, в отличие от почвы, лучше остаться сухими. Над участком с хорошо увлажненным грунтом при снижении температуры воздуха происходит конденсация, сопровождающаяся выделением тепла. Огород, прикрытый облаком водяных паров, вполне может противостоят радиационному весеннему заморозку. Влажная почва сохраняет тепло гораздо лучше. Рано утром температура поверхности влажной почвы, как минимум, на один градус выше, чем сухой.

Среди пассивных мер, применяемых для заморозков смешанного типа можно ис-

пользовать укрытие теплолюбивых растений и почвы около них пленкой или неткаными материалами, обильный полив накануне заморозка, мульчирование почвы органическими материалами. Всходы на картофельных грядках можно спасти, окучив их «с головой».

ВЫВОДЫ

Сочетание методов адаптивной фильтрации и распознавания образов, на базе общедоступной информации о метеорологических параметрах, представляемой метеостанциями в сети Интернет позволяет обеспечить достаточную для хозяйственных нужд надежность прогнозирования скрытых заморозков на сельскохозяйственных угодьях. Разработанный программно-технический комплекс, реализующий данную задачу может использоваться в сетевом портале для коллективного обслуживания сельскохозяйственных потребителей региона. Дальнейшее улучшение показателей работы такого комплекса возможен за счет развития структур частных моделей прогнозирования для отдельных метеофакторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берлянд М. Е., Красиков П. Н., Предсказание заморозков и борьба с ними, 2 изд., Л., 1960.
 Де Гроот М. Оптимальные статистические решения. М.: Мир, 1974.
 Гольцберг И. А., Агроклиматическая характеристика заморозков в СССР и методы борьбы с ними. Л., 1961.
 Кононенко О. В. Физико-статистические факторы предвидения скрытых заморозков // Вестник РАСХН, 2013, № 6, с. 5–7.
 Миленький А. В. Классификация сигналов в условиях неопределенности. М.: Советское радио, 1975.
 Современные методы идентификации систем / Под ред. П. Эйхоффа. М.: Мир, 1983.