

## Физика деятельного слоя атмосферы, агрометеорология и агроклиматология

УДК 551.524.37; 632.111.51; 632.111.52

### ОЦЕНКИ ФОРМИРОВАНИЯ И ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СКРЫТЫХ ЗАМОРОЗКОВ РАДИАЦИОННОГО ТИПА

**О. В. Кононенко**

*ГНУ Агрофизический научно-исследовательский институт Россельхозакадемии,  
Гражданский пр., 14, Санкт-Петербург, 195220  
E-mail: okveda@mail.ru*

*Поступила в редакцию 15 мая 2014 г., принята к печати 05 июня 2014 г.*

Представлен анализ факторов, определяющих процесс формирования заморозков радиационного типа. Для анализа и оценки вероятности наступления скрытого заморозка были использованы срочные наблюдения по данным Росгидрометцентра с 1977 по 2010 гг. по трем метеорологическим станциям Ленинградской области: Белогорка, Выборг и Тихвин.

Приведены расчетные данные, полученные на основе методики оценки вероятности возникновения скрытого заморозка. Согласно предлагаемой методике, для оценки вероятности возникновения скрытого заморозка является достаточным знание температуры поверхности почвы и температуры воздуха на высоте 2 м в 15, 18 и 21 час, а также скорости изменения их разности.

Предложенный подход позволяет дифференцировать метеорологические ситуации, приводящие к определенной степени вероятности к формированию скрытого заморозка по их динамике.

**Ключевые слова:** заморозок, скрытый заморозок, радиационное выхолаживание, температура поверхности почвы.

#### ВВЕДЕНИЕ

Заморозком является понижение температуры приземного слоя воздуха или почвы ниже нуля градусов на фоне положительных среднесуточных температур. Возникновение и развитие заморозка обусловлено метеорологическими факторами динамического характера и метеорологическими факторами местного характера (Чудновский, 1949). По степени преобладания указанных явлений выделяют два типа процесса возникновения заморозка: адвективные заморозки, связанные с передвижением холодных масс воздуха из других районов, и радиационные заморозки, возникающие вследствие интенсивного ночного излучения подстилающей поверхности. При одновременном воздействии обоих факторов возникают заморозки смешанного типа (Гольцберг, 1961). Скрытый заморозок относится к радиационному типу заморозков. В физической модели радиационного выхолаживания поверхности такой тип заморозка может возникать в приповерхностном слое воздуха, т.е. в слое нахождения вегетирующих растений (Чудновский, Шиндеров, 1977). На территории Ленинградской области заморозки радиаци-

онного типа являются климатически обусловленным явлением (Кононенко, 2013а).

#### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для анализа и оценки вероятности наступления скрытого заморозка были использованы срочные наблюдения по данным Росгидрометцентра с 1977 по 2010 гг. по трем метеорологическим станциям Ленинградской области: Белогорка, Выборг и Тихвин. Выбор периода обусловлен наличием в указанные годы данных о минимальной температуре поверхности почвы, что позволяет точнее оценить факт наступления заморозка.

При исследовании процессов формирования заморозков за скрытый заморозок принималась ситуация, при которой минимальная температура поверхности почвы опускалась ниже нуля, а минимальная температура воздуха на высоте 2 м оставалась положительной.

Для оценки вероятности наступления скрытого заморозка в качестве величины, определяющей основной характер и направленность динамического процесса радиационного выхолаживания, принимается разность скоростей изменения температур воздуха и поверхности почвы (или скорость из-

менения их разности)  $\Delta T' = \Delta T'_B - \Delta T'_П$ , где  $\Delta T'_B$  – скорость изменения температуры воздуха на высоте 2 м,  $\Delta T'_П$  – скорость изменения температуры поверхности почвы. Вероятность возникновения заморозка определяется как  $P = \frac{N_3}{\Sigma N}$ , где  $N_3$  – количество дней с заморозком при скорости изменения разности температур воздуха и поверхности почвы в выбранном диапазоне,  $\Sigma N$  – полное количество дней наблюдений при тех же условиях (Кононенко, 2013б).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Вероятность наступления заморозков рассчитана для двух сроков наблюдений: 18 и 21 час. Величина динамики разности температур влияет на изменение оценки вероятности возникновения скрытого заморозка: чем выше скорость изменения в указанные сроки наблюдений, тем выше вероятность возникновения заморозков при прочих равных условиях. При анализе метеорологических параметров после 21 часа следует отметить, что скорости изменения температур поверхности почвы и воздуха различны и каждая из них уменьшается по мере приближения ко времени начала заморозка. При этом скорость изменения температуры поверхности почвы выше, чем скорость изменения температуры воздуха. Также нужно учитывать, что знак указанной разности при переходе от режима формирования замороз-

ка к собственно заморозку меняется на обратный.

На станциях, расположенных на берегу крупных водоемов, (Выборг) или на возвышенностях (Белогорка), количество дней с заморозками меньше, чем на станциях, расположенных на равнинах, в низинах и вдали от крупных водоемов (Тихвин). Так, на станции Выборг в любой день мая, независимо от распределения скорости изменения температур воздуха и поверхности почвы, вероятность возникновения заморозка составляет 16%, а на станции Тихвин в тот же период – 32%.

Скорость изменения разности температур воздуха и поверхности почвы изменяется в широком диапазоне и может колебаться, например, в мае от  $-7$  до  $8^\circ\text{C}/\text{час}$  в суточном цикле.

Из анализа данных, приведенных в таблице 1, можно заключить, что существенную роль в анализе метеорологической ситуации, предрасполагающей к возникновению скрытого заморозка, играет температура воздуха в период наблюдений. Например, если температура воздуха в 21 час на станции Тихвин составляет ниже  $4^\circ\text{C}$ , за нижнюю границу диапазона разности скоростей изменения температур нужно принимать  $0^\circ\text{C}/\text{час}$ , а если в это же время температура воздуха колеблется в пределах от  $8$  до  $12^\circ\text{C}$ , минимальную разность скоростей целесообразно принять равной  $1^\circ\text{C}/\text{час}^{-1}$ .

Таблица 1. Относительная частота скорости изменения разности температур воздуха и поверхности почвы (май, 21 час, ГМС Тихвин)

Т воздуха, °С	0÷4		4÷8		8÷12		12÷16	
	заморозок	нет заморозка	заморозок	нет заморозка	заморозок	нет заморозка	заморозок	нет заморозка
Скорость изменения разности температур, °С/час								
0	0,11	0	0,02	0,08	0,01	0,04	0,21	0,04
0,5	0,23	0,47	0,07	0,38	0,03	0,20	0,00	0,10
1	0,22	0,40	0,12	0,28	0,10	0,24	0,05	0,16
1,5	0,11	0,13	0,18	0,08	0,09	0,16	0,02	0,19
2	0,14	0	0,11	0,08	0,17	0,15	0,09	0,13
2,5	0,11	0	0,18	0,05	0,13	0,10	0,02	0,10
3	0,02	0	0,16	0,01	0,20	0,07	0,14	0,12
3,5	0,03	0	0,08	0,01	0,14	0,03	0,33	0,06
4	0,00	0	0,05	0	0,07	0,00	0,14	0,07
4,5	0,02	0	0,02	0	0,04	0,00	0,09	0,01
5	0,02	0	0,01	0	0,02	0,01	0,05	0,00

Температура поверхности почвы и скорость её изменения являются одними из основных факторов при развитии радиационного выхолаживания. На рисунках 1 и 2 на примере станции Тихвин показаны распределения данного параметра в различные периоды наблюдений в дни с заморозком и без. Так, в мае в 18 час на станции Тихвин в дни с заморозком в 85% случаев температура по-

верхности почвы не превышает 22°C, для дней без заморозка такая температура наблюдается в 62% случаев (рис. 1).

В мае в 21 час на станции Тихвин в дни с заморозком в 91% случаев температура поверхности почвы не превышает 10°C. В дни без заморозка в 67% случаев температура воздуха выше 10°C (рис. 2).

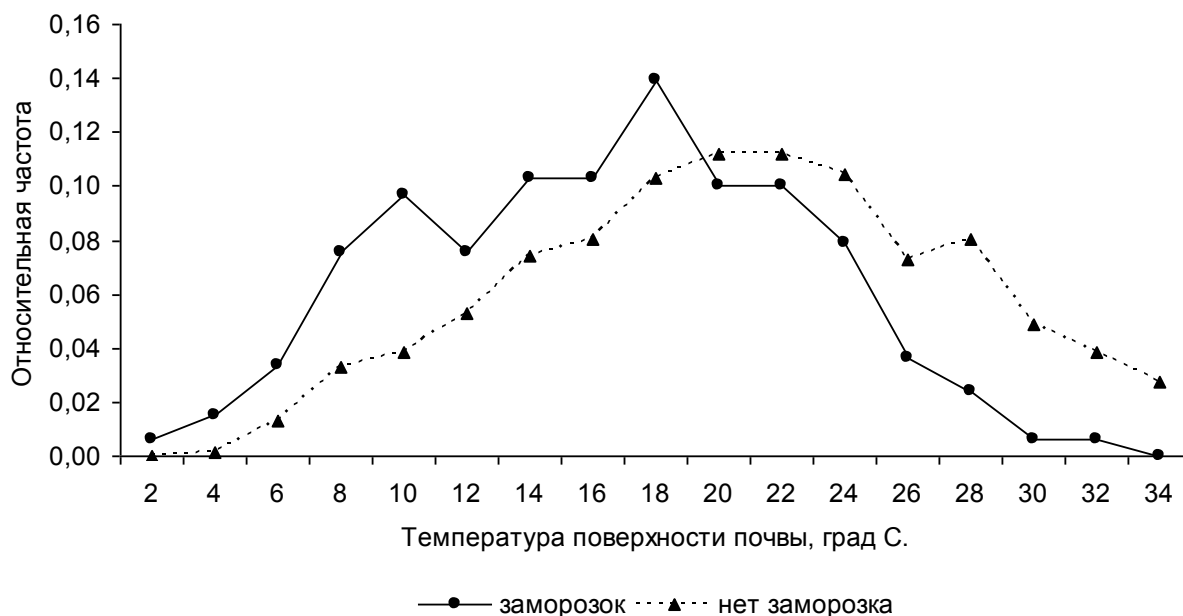


Рис. 1. Распределение температуры поверхности почвы в мае в 18:00 в день с заморозком и без

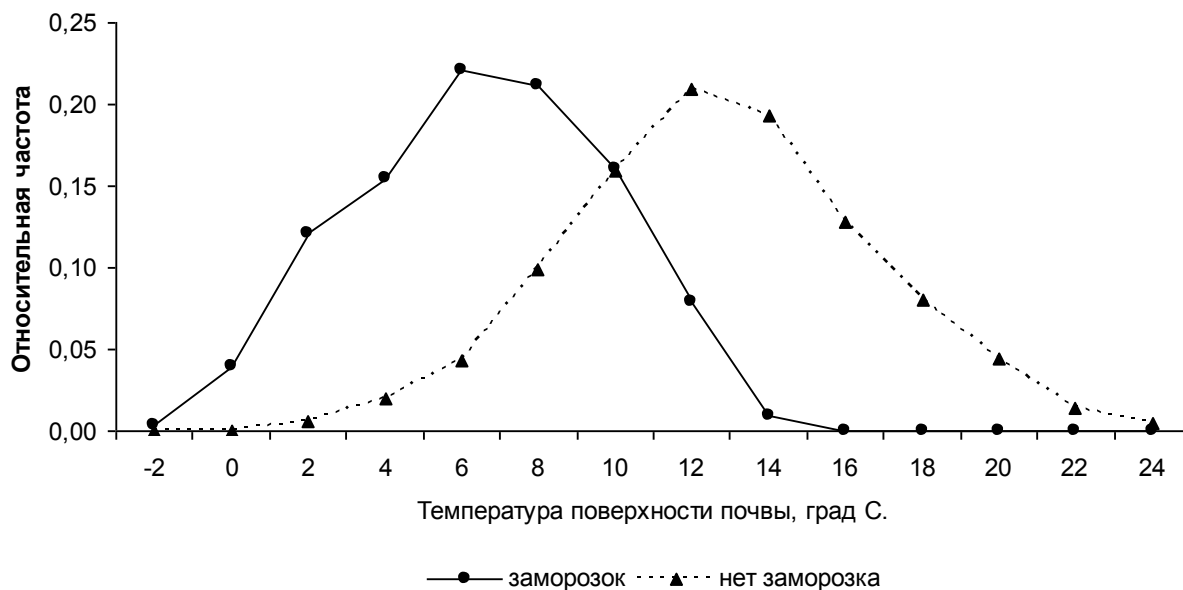


Рис. 2. Распределение температуры поверхности почвы на станции Тихвин в мае в 21:00 в дни с заморозками и без

На рисунке 3 показана частота возникновения заморозков при различных скоростях изменения разности температур для интервалов температур поверхности почвы. На станции Тихвин заморозки чаще всего возникают, если в 21:00 температура поверхности почвы составляет от 2 до 8°C и скорость

изменения разности температур воздуха и поверхности почвы находится в пределах от 1 до 3°C/час. Если при таких же температурах поверхности почвы скорость изменения разности температур менее 1°C/час, вероятность возникновения заморозка невелика.

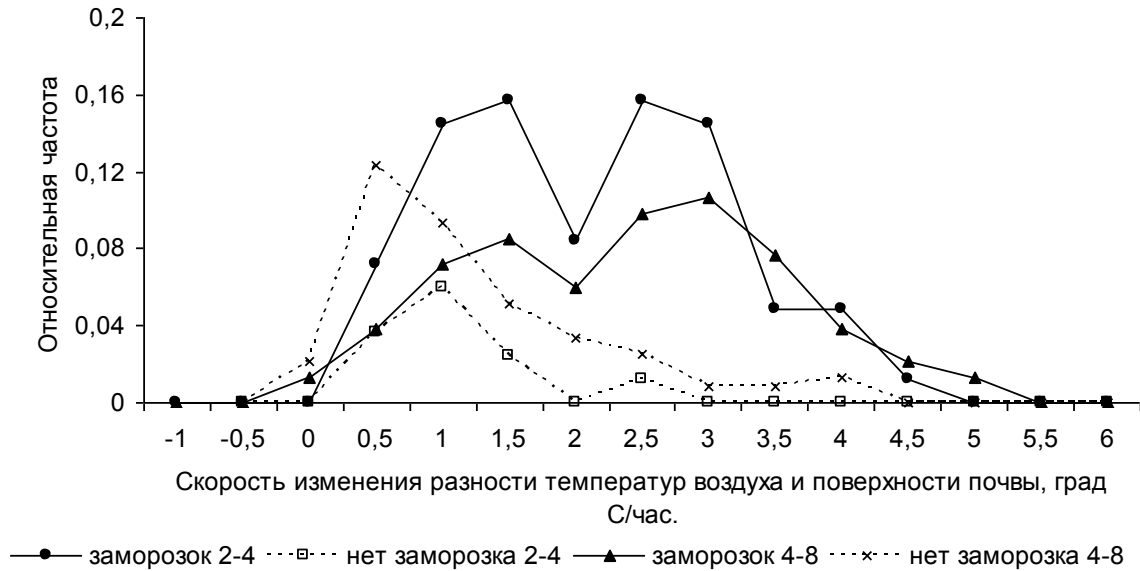


Рис. 3. Распределение скорости изменения разности температур на станции Тихвин в мае при различных температурах поверхности почвы в 21:00.

Повысить достоверность прогноза заморозков можно посредством выбора соответствующих диапазонов разности для каждого интервала температур воздуха (Кононенко, 2013 б, 2013в). Таким образом, для формирования таблицы 2 и последующих таблиц такого типа назначаются диапазоны скорости изменения, обеспечивающие наибольшую достоверность.

Для дальнейших оценок границы диапазона скорости изменения температур подобраны с учетом частотного распределения возникновения заморозков в исследуемый период года. Верхние границы температуры воздуха определены с учетом максимальных срочных значений температур в день с заморозком. Так, например, в мае на станции Выборг за весь исследуемый период в дни, когда в 18 часов (табл. 2) температура воздуха составляла более 16,5°C, заморозки не фиксировались.

За дни с заморозком принимались такие дни, когда минимальная температура по-

верхности почвы между сроками наблюдений принимала отрицательные значения, хотя для оценки возникновения собственно скрытых заморозков на поверхности растительного покрова в случае, если прогноз строится на основании температуры поверхности почвы, за дни с заморозком можно принимать также и те дни, в которые минимальная температура поверхности почвы достигала 0,5°C и даже 1°C и не переходила в отрицательную зону, поскольку теплоемкость почвы значительно выше теплоемкости растений и при развитии радиационного выхолаживания поверхности растительный покров будет выхолаживаться сильнее поверхности почвы.

Совместное рассмотрение данных по весеннему и осеннему сезонам не представляется корректным, поскольку разности скоростей в различные сезоны отличаются даже знаком: весной такие разности положительны, а осенью в некоторые сроки измерения отрицательны (табл. 2–5).

**Таблица 2. Оценка вероятности возникновения скрытого заморозка в мае по данным срочных наблюдений в 18 и 21 час на станции Выборг для интервалов температуры воздуха**

Время наблюдения	Температура воздуха, °С	≤ 4	4 ≤ 6	6 ≤ 8	8 ≤ 10	10 ≤ 12	12 ≤ 14	14 ≤ 16,5
	Скорость изменения, °С/час							
18:00	0,5–3,5	0,57	0,54	0,45	0,26	0,15	0,08	0,05
21:00	1,5–4	1,00	0,64	0,53	0,25	0,07	0,06	-

**Таблица 3. Оценка вероятности возникновения скрытого заморозка в сентябре по данным срочных наблюдений в 18 и 21 час на станции Выборг для интервалов температуры воздуха**

Время наблюдения	Температура воздуха, °С	≤ 4	4 ≤ 6	6 ≤ 8	8 ≤ 10	10 ≤ 12	12 ≤ 14
	Скорость изменения, °С/час						
18:00	(-3) – 0	0,75	0,47	0,26	0,11	0,06	0,02
21:00	0,5–3,5	0,77	0,37	0,16	0,04	-	-

**Таблица 4. Оценка вероятности возникновения скрытого заморозка в мае по данным срочных наблюдений в 18 и 21 час на станции Тихвин для интервалов температуры воздуха**

Время наблюдения	Температура воздуха, °С	≤ 4	4 ≤ 6	6 ≤ 8	8 ≤ 10	10 ≤ 12	12 ≤ 14	14 ≤ 16	16 ≤ 18	18 ≤ 21
	Скорость изменения, °С/час									
18:00	0,5–3,5	0,73	0,88	0,66	0,56	0,57	0,46	0,43	0,20	0,12
21:00	1,5–4	0,95	0,82	0,79	0,53	0,47	0,20	-	-	-

**Таблица 5. Оценка вероятности возникновения скрытого заморозка в сентябре по данным срочных наблюдений в 18 и 21 час на станции Тихвин для интервалов температуры воздуха**

Время наблюдения	Температура воздуха, °С	≤ 4	4 ≤ 6	6 ≤ 8	8 ≤ 10	10 ≤ 12	12 ≤ 14	14 ≤ 16	16 ≤ 18
	Скорость изменения, °С/час								
18:00	0,5–4	0,69	0,74	0,36	0,38	0,28	0,22	0,18	0,08
21:00	(-0,5) – 3	0,75	0,50	0,31	0,12	0,03	-	-	-

**Таблица 6. Оценка вероятности возникновения скрытого заморозка в мае по данным срочных наблюдений в 18 и 21 час на станции Белогорка для верхних границ температуры воздуха**

Время наблюдения	Температура воздуха, °С	≤ 4	≤ 6	≤ 8	≤ 10	≤ 12	≤ 14	≤ 16	≤ 18	≤ 21,5
	Скорость изменения, °С/час									
18:00	0–3	0,59	0,62	0,54	0,47	0,42	0,38	0,33	0,29	0,24
21:00	0,5–4,5	0,84	0,74	0,61	0,53	0,45	0,37	0,26	0,21	-

**Таблица 7. Оценка вероятности возникновения скрытого заморозка в мае по данным срочных наблюдений в 18 и 21 час на станции Белогорка для интервалов температуры воздуха**

Время наблюдения	Температура воздуха, °С	≤ 4	4 ≤ 6	6 ≤ 8	8 ≤ 10	10 ≤ 12	12 ≤ 14	14 ≤ 16	16 ≤ 18	18 ≤ 21,5
	Скорость изменения, °С/час									
18:00	0–3	0,59	0,64	0,47	0,38	0,33	0,24	0,15	0,09	0,02
21:00	0,5–4,5	0,84	0,67	0,45	0,41	0,28	0,11	0,02	0,00	-

**Таблица 8. Оценка вероятности возникновения скрытого заморозка в сентябре по данным срочных наблюдений в 18 и 21 час на станции Белогорка для верхних границ температуры воздуха**

Время наблюдения	Температура воздуха, °С	≤ 4	≤ 6	≤ 8	≤ 10	≤ 12	≤ 14	≤ 16	≤ 19
	Скорость изменения, °С/час								
18:00	0–3	0,40	0,38	0,29	0,24	0,18	0,14	0,12	0,11
21:00	0–1,5	0,51	0,40	0,64	0,18	0,13	-	-	-

**Таблица 9. Оценка вероятности возникновения скрытого заморозка в сентябре по данным срочных наблюдений в 18 и 21 час на станции Белогорка для интервалов температуры воздуха.**

Время наблюдения	Температура воздуха, °С	≤ 4	4 ≤ 6	6 ≤ 8	8 ≤ 10	10 ≤ 12	12 ≤ 14	14 ≤ 16	16 ≤ 19
	Скорость изменения, °С/час								
18:00	0–3	0,40	0,38	0,24	0,18	0,08	0,06	0,05	0,04
21:00	0–1,5	0,51	0,34	0,12	0,01	0,01	-	-	-

Из таблиц 6–9 видно, что вне зависимости от сезона и срока наблюдения оценка вероятности возникновения заморозка по «верхней границе» температуры воздуха приводит к преувеличению возможности возникновения скрытого заморозка (чем выше температура воздуха, тем сильнее завышается ожидание). При ограничении только верхнего значения температуры воздуха в выборку попадают все ситуации заморозков, появившихся и при более низких температурах воздуха, которые и обуславливают более высокую вероятность возникновения заморозков. В случае, когда за верхнюю границу принимается максимальная температура воздуха, при которой наблюдался заморозок, такая оценка означает собственно вероятность возникновения заморозка в любой день мая или сентября соответственно при заданных границах диапазона скоростей изменения разности температур воздуха и почвы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гольцберг И.А. 1961. Агроклиматическая характеристика заморозков в СССР и методы борьбы с ними. Л., Гидрометеиздат, 198с.
- Кононенко О. В. 2013а. Климатическая обусловленность радиационных и скрытых заморозков // Материалы научной сессии АФИ по итогам 2012 года. СПб.: РАСХН, АФИ. С. 105–110.
- Кононенко О. В. 2013б. Физико-статистические предпосылки и методика оценки вероятности возникновения скрытых заморозков. Диссертация на соискание степени кандидата сельскохозяйственных наук. Спб., ГНУ АФИ, 164с.
- Кононенко О.В. 2013в. Физико-статистические факторы предвидения скрытых заморозков // Вестник РАСХН. 6: 12–14.
- Чудновский А.Ф. 1949. Заморозки. Л.: Гидрометеиздат. 240 с.
- Чудновский А.Ф., Шиндеров Б.Л. 1977. Расчетный метод количественной оценки скрытого заморозка // Прогнозирование вредных агрометеорологических явлений и оптимизация борьбы с ними. Сборник трудов АФИ. Вып. 37. Л. С. 9–18.

#### ВЫВОДЫ

Таким образом, согласно предлагаемой методике, для оценки вероятности возникновения скрытого заморозка является достаточным знание температуры поверхности почвы и температуры воздуха на высоте 2 м в 15, 18 и 21 час, а также скорости изменения их разности.

С точки зрения предсказания явления в конкретный день, оценка по температурному интервалу дает более точную картину вероятности возникновения заморозка по данным срочных наблюдений. Оценка лишь по верхней границе может использоваться для выбора культур по характеристикам морозостойкости или для определения оптимальных сроков посевных работ.

Предложенный подход позволяет дифференцировать метеорологические ситуации, приводящие с определённой степенью вероятности к формированию скрытого заморозка по их динамике.