

КЛИМАТИЧЕСКАЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ СРОКОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АГРОБИОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ РАДИАЦИОННЫХ ЗАМОРОЗКОВ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ РЕГИОНЕ РОССИИ

О. В. Кононенко

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»

195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14

E-mail: okveda@mail.ru

Поступила в редакцию 14 октября 2020 г., принята к печати 25 ноября 2020 г.

Сельскохозяйственные культуры в различные фазы онтогенеза предъявляют определенные требования к температурно-влажностным условиям. Значительная межгодовая вариабельность погодных условий определяет изменчивость сроков проведения полевых работ. В некоторых случаях, зная сроки достижения культурой определенной фазы развития, можно создать оптимальные для ее произрастания условия, в том числе путем подбора сроков сева. Для определения оптимальных с точки зрения динамики онтогенеза культур и сортов сроков проведения агротехнических мероприятий следует учитывать, помимо текущей метеорологической обстановки, многолетние средние статистических характеристик риска возникновения радиационных заморозков в каждую декаду месяца. В настоящем исследовании такие характеристики представлены для метеорологических станций, на которых отмечено наибольшее количество дней с заморозками, расположенных в пяти областях Северо-Западного региона с наиболее развитым сельскохозяйственным растениеводством: Вологодской, Калининградской, Ленинградской, Новгородской и Псковской. Для изучения временных изменений исследования проводились на двух временных интервалах: с 1966 по 1990 гг. и с 1991 по 2015 гг. Сравнительный анализ показал, что несмотря на общую тенденцию к уменьшению количества заморозков в последние годы, наблюдается некоторое перераспределение их внутри декад изучаемых месяцев. Выявлена разнонаправленная динамика наступления средней даты последнего заморозка. Так, на станциях Тихвин и Вытегра последний заморозок наблюдается в среднем в более ранние числа мая. На станции Тихвин средняя дата сдвинулась с 29 на 24 мая, на станции Вытегра – с 17 на 15 мая. На станциях Старая Русса, Гдов и Железнодорожный средняя дата последнего заморозка, наоборот, сдвинулась на более поздние сроки. На станциях Старая Русса и Гдов смещение оказалось незначительным и составило 1 день, на станции Железнодорожный — более значительным, средняя дата последнего заморозка сместилась с 5 на 11 мая.

Ключевые слова: радиационный заморозок, радиационное выхолаживание, безморозный период, агробиологические риски.

CLIMATIC CONDITIONALITY OF THE TIME OF AGROBIOLOGICAL RISKS OF RADIATION FROSTS IN THE NORTH-WEST REGION OF RUSSIA

O.V. Kononenko

Agrophysical Research Institute,

14, Crazhdanskiy pr., Saint-Petersburg, 195220; E-mail: okveda@mail.ru

Agricultural crops in different phases of ontogenesis impose certain requirements on temperature and humidity conditions. The significant inter-annual variability of weather conditions determines the variability in the timing of field works. In some cases, based on the timing of the crop reaching a certain stage of development, it is possible to create optimal conditions for its growth, including the timing of sowing selection. To determine the optimal timing for different management practices from the point of view of crops' dynamics and changes in the plant ontogenesis, in addition to the current meteorological data, the long-term average statistical characteristics of the radiation frost risk in each decade of the month should be also taken into account. In this study such characteristics are presented for meteorological stations which have the largest number of days with frosts. The stations are located in five regions of the North-Western region of Russia with the most developed agricultural crop production: Vologda, Kaliningrad, Leningrad, Novgorod and Pskov. To study temporal changes, the study was carried out at two time intervals: from 1966 to 1990 and from 1991 to 2015. Comparative analysis showed that despite the general tendency towards a decrease in the number of frosts in recent years, there was some redistribution of them within the decades of the studied months. The multidirectional dynamics of the onset of the average date of the last frost was revealed. Thus, at Tikhvin and Vytegra stations, the last frost was observed on average in the earlier days of May. At Tikhvin station, the average date shifted from May 29 to May 24, at Vytegra station – from May 17 to May 15. On the contrary, at Staraya Russa, Gdov and Zheleznodorozhnyi stations, the average date of the last frost shifted to later period. At Staraya Russa and Gdov stations, the shift was insignificant and amounted to 1 day, at Zheleznodorozhnyi station it was significant, the average date of the last frost shifted from May 5 to May 11.

Keywords: radiation frost, radiation cooling, frost-free period, agrobiological risks.

ВВЕДЕНИЕ

На территории Северо-Западного региона России большую часть посевных площадей занимают озимая и яровая пшеница, озимый и яровой ячмень, овес, кормовые культуры, картофель промышленного выращивания.

С точки зрения требований сельскохозяйственных культур к климатическим характеристикам тепло- и влагообеспеченности, Северо-Западный регион относится к зоне рискованного земледелия. Основными рисками в земледелии являются:

- природные риски: изменчивость погодных условий и опасные агрометеорологические явления;
- агроэкологические риски: критические для роста и развития растений условия среды обитания;
- агрономические риски: технологические – обусловленные нарушением агротехнологий; риск неверного определения сроков проведения технологических операций;
- информационные риски: отсутствие достоверной информации о региональных факторах риска, текущем состоянии объекта управления и параметрах среды; неопределенность и низкая оправдываемость метеорологических и климатических прогнозов (Усков, 2015).

Агробиологические риски возникновения радиационных заморозков относятся к природным рискам, в связи с чем их прогноз характеризуется малой заблаговременностью. Поздние весенние и ранние осенние заморозки являются одним из факторов, влияющих на конечную продуктивность сельскохозяйственных культур. Поздние весенние заморозки повреждают всходы, генеративные побеги и цветки, ранние осенние заморозки сокращают период вегетации и приводят к снижению урожая за счет повреждения растений. Заморозок – это понижение температуры воздуха или поверхности почвы (растительного покрова) ниже 0°C в течение вегетационного периода на фоне положительных среднесуточных температур. Опасный для растений заморозок – это комплексное сложное явление, определяемое совокупностью климато-географических, физико-метеорологических и биологических факторов (Чудновский, 1949). Биологические факторы обусловлены степенью морозоустойчивости растения на каждом этапе вегетации и его адаптивными возможностями.

Величина опасности заморозка для сельскохозяйственных культур является различной и зависит от времени его наступления, интенсивности и длительности. Значительную роль играют также состояние самого растения (фазы его развития, культура, сорт) и условия агротехники (густота стояния, характер удобрений). Каждая конкретная культура и сорт предъявляют различные требования к термическому режиму периода вегетации. Одними из важных характеристик термического режима являются наличие и интенсивность заморозков в течение вегетационного периода (Гольцберг, 1961).

В. Н. Степанов (1948) выделяет пять основных групп сельскохозяйственных культур по степени их устойчивости к заморозкам.

К первой группе относятся наиболее устойчивые культуры, выдерживающие кратковременное понижение температуры до $-7...-10^{\circ}\text{C}$ и ниже. К ней принадлежит ряд культур умеренного пояса: ранние яровые хлеба, зернобобовые и масличные раннего высева.

Ко второй группе отнесены культуры, устойчивые к заморозкам до $-5...-8^{\circ}\text{C}$, такие как корнеплоды, большинство масличных, лен, конопля.

Третью группу составляют среднестойкие культуры, переносящие заморозки до $-3...-4^{\circ}\text{C}$, например соя, могар, канатник.

Четвертая группа – малоустойчивые к заморозкам растения, выдерживающие кратковременные понижения температуры до $-2...-3^{\circ}\text{C}$, такие как картофель, кукуруза, просо.

Пятую группу составляют неустойчивые к заморозкам растения, всходы которых повреждаются при снижении температуры до $-0,5...-1,5^{\circ}\text{C}$. К ней относятся некоторые растения умеренных широт, например гречиха, а также наиболее теплолюбивые растения: фасоль, рис, хлопчатник, бахчевые, кунжут, арахис и др.

Генеративные органы растений гораздо более чувствительны к заморозкам и повреждаются уже при слабых кратковременных понижениях температуры до $0...-2^{\circ}\text{C}$. Гибель цветков большинства растений происходит при $-3...-4^{\circ}\text{C}$, причем подобные повреждения в фазу цветения не зависят от общей устойчивости культуры к заморозкам. В фазу молочной спелости зерно основных зерновых культур повреждается при $-2...-4^{\circ}\text{C}$. Радиационные заморозки представляют наибольшую опасность, поскольку возникают в периоды активной вегетации вследствие резкого падения ночной температуры при высоких дневных температурах.

Согласно прогнозам Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), частота возникновения экстремальных температурных явлений увеличится по сравнению с последними годами (IPCC, 2013). Экстремальные погодные явления уже представляют собой серьезную проблему для производителей зерна, и, согласно прогнозам, в будущем их количество только увеличится (Zheng, 2012). Несмотря на глобальное потепление, тенденция к увеличению количества дней с заморозками, наблюдающаяся в некоторых регионах, как ожидается, сохранится до середины 2030-х годов (Crimp, 2013, 2014). Морозоустойчивость растений на некоторых стадиях онтогенеза не гарантирует такую же резистентность в период репродуктивного развития (Al-Issawi, 2012; Asseng, 2011; Fuller, 2007; Frederiks, 2011). Таким образом, выбор культур должен осуществляться не только в соответствии с их общей морозостойкостью, но и с устойчивостью к заморозкам на репродуктивных стадиях развития (Hatfield, 2015; Barlow, 2015).

Погодные условия Северо-Западного региона России характеризуются сильной межгодовой изменчивостью, в связи с чем сроки проведения полевых работ варьируются из года в год. Для определения оптимальных с точки зрения динамики онтогенеза культур и сортов сроков агротехнических

мероприятий следует учитывать, помимо текущей метеорологической обстановки, многолетние средние статистических характеристик риска возникновения радиационных заморозков в каждую декаду месяца. В настоящем исследовании такие характеристики представлены для гидрометеорологических станций (ГМС), на которых отмечено наибольшее количество дней с заморозками, расположенных в различных областях Северо-Западного региона (Кононенко, 2015, 2018). Для изучения временных изменений исследования проводились на двух временных интервалах: с 1966 по 1990 гг. и с 1991 по 2015 гг. Для оценки агробиологических рисков возникновения радиационных заморозков в онтогенезе районированных полевых культур потребовалось решить следующие задачи: определить статистическую вероятность и частоту возникновения

радиационного заморозка в любой день декады весенне-летнего периода; рассчитать среднюю дату последнего весеннего заморозка; выявить количественное распределение последних весенних заморозков по декадам для метеорологических станций Северо-Западного региона.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование агробиологических рисков возникновения радиационных заморозков проводилось для метеостанций, на которых отмечено наибольшее количество дней с заморозками. Метеостанции расположены в пяти областях региона с наиболее развитым сельскохозяйственным растениеводством: Вологодской, Калининградской, Ленинградской, Новгородской и Псковской (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики гидрометеорологических станций

ГМС	Высота над уровнем моря, м	Широта, ° с. ш.	Долгота, ° в. д.
Ленинградская область, Тихвин	61	59,39	33,33
Вологодская область, Вытегра	55	61,01	36,27
Псковская область, Гдов	39	58,44	27,5
Новгородская область, Старая Русса	24	58,01	31,19
Калининградская область, Железнодорожный	49	54,22	21,18

Для изучения агробиологических рисков возникновения радиационных заморозков использовались данные ежедневных срочных наблюдений штатной метеорологической сети со срочностью три часа за безморозный период с мая по октябрь с 1966 по 2015 гг. (50 лет), опубликованные Всероссийским научно-исследовательским институтом гидрометеорологической информации — Мировой центр данных. За дни с радиационными заморозками принимались сутки, в течение которых хотя бы за один срок наблюдений температура поверхности почвы или температура воздуха и поверхности почвы имела отрицательные значения на фоне положительных среднесуточных температур. Облачность в определяющие сроки наблюдений не превышала три балла, скорость ветра — 3 м с^{-1} .

Согласно Техническому регламенту Всемирной метеорологической организации (ВМО), климатические параметры и их изменения оцениваются по климатологическим стандартным нормам (30-летние периоды), либо средним значениям за период более 10 лет (ВМО, 2015). В данном исследовании оценка агробиологических рисков проводилась для двух 25-летних периодов: с 1966 по 1990 гг. и с 1991 по 2015 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно результатам проведенных исследований (табл. 2, 3), на метеостанции Тихвин (Ленинградская область) вероятность возникновения радиационных заморозков во все три декады мая довольно высока и соответствует сезонному ходу температур. Наибольшая вероятность приходится на первую декаду и далее плавно снижается до июня. В июне вероятность возникновения заморозков существует, но является крайне малой. Следует отметить, что при общем незначительном снижении за последние 25 лет вероятность возникновения заморозков во второй декаде мая и первой декаде июня увеличилась.

На метеостанции Вытегра (Вологодская область) вероятность возникновения заморозков во все три декады мая довольно высока и плавно снижается к июлю в соответствии с сезонным ходом температур. Однако в период 1991–2015 гг. вероятность возникновения заморозков была ниже, чем за предыдущие 25 лет, и крайне малой во второй и третьей декаде июня.

На метеостанциях Старая Русса, Гдов и Железнодорожный вероятность возникновения радиационных заморозков невелика, однако в последние 25 лет наблюдается увеличение их количества во всех трех декадах мая. Заморозки в июне маловероятны.

Таблица 2. Статистическая вероятность возникновения радиационных заморозков по декадам, %

ГМС	Период, годы	1 декада мая	2 декада мая	3 декада мая	1 декада июня	2 декада июня	3 декада июня
Ленинградская область, Тихвин	1966–1990	33	21	16	4	1	1
	1991–2015	32	25	11	5	0	0
Вологодская область, Вытегра	1966–1990	37	25	19	8	2	2
	1991–2015	29	21	14	4	0	0
Псковская область, Гдов	1966–1990	15	7	3	0	–	–
	1991–2015	17	9	0	0	–	–
Новгородская область, Старая Русса	1966–1990	7	4	1	–	–	–
	1991–2015	13	6	1	–	–	–
Калининградская область, Железнодорожный	1966–1990	10	5	1	–	–	–
	1991–2015	14	3	4	–	–	–

Таблица 3. Частота возникновения заморозков по декадам, дни

ГМС	Период, годы	1 декада мая	2 декада мая	3 декада мая	1 декада июня	2 декада июня	3 декада июня
Ленинградская область, Тихвин	1966–1990	83	53	44	9	2	2
	1991–2015	80	62	31	12	0	0
Вологодская область, Вытегра	1966–1990	93	63	52	20	4	5
	1991–2015	72	59	34	9	1	0
Псковская область, Гдов	1966–1990	38	17	8	0	–	–
	1991–2015	39	22	1	1	–	–
Новгородская область, Старая Русса	1966–1990	17	10	4	–	–	–
	1991–2015	29	15	3	–	–	–
Калининградская область, Железнодорожный	1966–1990	24	13	3	–	–	–
	1991–2015	32	7	9	–	–	–

Важной характеристикой продолжительности безморозного периода является средняя дата последнего заморозка. При сравнении двух временных периодов выявлена разнонаправленная динамика средних дат последнего заморозка на метеостанциях (табл. 4). На станциях Тихвин и Вытегра последний заморозок наблюдается в среднем в более ранние числа мая. На станции Тихвин средняя дата сдвинулась

с 29 на 24 мая, на станции Вытегра – с 17 на 15 мая. На станциях Старая Русса, Гдов и Железнодорожный, наоборот, средняя дата последнего заморозка сдвинулась на более поздние сроки. На станциях Старая Русса и Гдов смещение оказалось незначительным и составило один день, на станции Железнодорожный – более значительным, средняя дата последнего заморозка сместилась с 5 на 11 мая.

Таблица 4. Средняя дата последнего заморозка

ГМС	Период, годы	Дата
Ленинградская область, Тихвин	1966–1990	29 мая
	1991–2015	24 мая
Вологодская область, Вытегра	1966–1990	17 мая
	1991–2015	15 мая
Псковская область, Гдов	1966–1990	9 мая
	1991–2015	10 мая
Новгородская область, Старая Русса	1966–1990	5 мая
	1991–2015	6 мая
Калининградская область, Железнодорожный	1966–1990	5 мая
	1991–2015	11 мая

Данные о распределении фактических дат последних заморозков по декадам представляют интерес с точки зрения онтогенеза культур и сортов при планировании агротехнических мероприятий. Попадание определенных фаз развития на декады с наибольшей вероятностью возникновения заморозков может повлечь приостановку развития или гибель растений. С другой стороны, оценивая динамику изменения последних дат возникновения заморозков, можно принимать решения об оптимизации сроков сева или выборе соответствующих культур и сортов.

В табл. 5 представлена динамика фактического количества дней с последним весенним заморозком. На метеостанциях Тихвин и Вытегра последний заморозок наблюдается в основном в третьей декаде мая и первой декаде июня. На метеостанциях Старая Русса, Гдов и Железнодорожный последние заморозки в основном наблюдаются в третьей декаде апреля, первой и второй декаде мая, однако следует отметить, что в период 1990–2015 гг. последние заморозки в апреле наблюдались гораздо реже, произошло их смещение на более поздние декады мая (табл. 5).

Таблица 5. Количественное распределение последних весенних заморозков по декадам

ГМС	Период, годы	3 декада апреля	1 декада мая	2 декада мая	3 декада мая	1 декада июня	2 декада июня	3 декада июня
Ленинградская область, Тихвин	1966–1990	–	3	3	10	6	1	2
	1991–2015	–	3	6	7	8	–	–
Вологодская область, Вытегра	1966–1990	–	0	3	9	9	3	1
	1991–2015	–	4	8	8	4	1	–
Псковская область, Гдов	1966–1990	5	9	5	6	0	–	–
	1991–2015	3	10	10	1	1	–	–
Новгородская область, Старая Русса	1966–1990	9	6	5	3	–	–	–
	1991–2015	6	10	6	3	–	–	–
Калининградская обл., Железнодорожный	1966–1990	12	5	5	3	–	–	–
	1991–2015	4	8	6	7	–	–	–

ВЫВОДЫ

Согласно результатам проведенных исследований, на метеостанции Тихвин (Ленинградская область) вероятность возникновения радиационных заморозков во все три декады мая довольно высока и соответствует сезонному ходу температур. Следует отметить, что при общем незначительном снижении за последние 25 лет вероятность возникновения заморозков во второй декаде мая и первой декаде июня увеличилась.

На метеостанции Вытегра (Вологодская область) вероятность возникновения заморозков во все три декады мая довольно высока и плавно снижается к июлю в соответствии с сезонным ходом температур. Однако в период 1991–2015 гг. вероятность возникновения заморозков была ниже, чем за предыдущие 25 лет, и крайне малой во второй и третьей декаде июня.

На метеостанциях Старая Русса, Гдов и Железнодорожный вероятность возникновения заморозков в мае невелика, однако в последние 25 лет наблюдается увеличение их количества во всех трех декадах мая. Заморозки в июне маловероятны.

При сравнении двух временных периодов выявлена разнонаправленная динамика средних дат последнего заморозка на метеостанциях. На станциях Тихвин и Вытегра последний заморозок в среднем наблюдается в более ранних числах мая. На станции Тихвин средняя дата сдвинулась с 29 на 24 мая, на станции Вытегра – с 17 на 15 мая. На станциях Старая Русса, Гдов и Железнодорожный, наоборот, средняя дата последнего заморозка сдвинулась на более поздние сроки. На станциях Старая Русса и Гдов смещение даты было незначительным и составило один день, на станции Железнодорожный – более значительным, средняя дата последнего заморозка сместилась с 5 на 11 мая.

Полученные результаты могут использоваться для определения оптимальных сроков проведения агротехнических мероприятий с точки зрения динамики онтогенеза культур и сортов.

Список литературы

- ВМО № 49. Технический регламент. Т. 1. Общие метеорологические стандарты и рекомендуемые практики. 2015. 38 с.
- Гольцберг И. А. Агроклиматическая характеристика заморозков в СССР и методы борьбы с ними. Л., ГМИ, 1961. 198 с.
- Кононенко О. В. Особенности возникновения заморозков радиационного типа по территории Ленинградской области // Агрофизика. 2015. № 4. С. 31–36.
- Кононенко О. В. Статистическая структура и зональное распределение радиационных заморозков по территории Северо-Западного региона Российской Федерации // Агрофизика. 2018. № 4. С. 59–67.
- Усков И. Б., Усков А. О. Основы адаптации земледелия к изменениям климата: Справочное издание. СПб.: «Нестор-История», 2014. 385 с.
- Чудновский А. Ф. Заморозки. Л.: Гидрометеиздат, 1949. 240 с.
- Al-Issawi M., Rihan H., El-Sarkassy N., Fuller M. Frost hardness expression and characterisation in wheat at ear emergence // J. Agron. Crop Sci., 2012, v. 199, pp. 66–74.
- Asseng S., Foster I.A.N., Turner N.C. The impact of temperature variability on wheat yields // Glob. Change Biol., 2011, v. 17, pp. 997–1012.
- Barlow K.M., Christy B.P., O’Leary G.J., Riffkin P.A., Nuttall J.G. Simulating the impact of extreme heat and frost events on wheat crop production: a review // Field Crops Res., 2015, v. 171, pp. 109–119. DOI: 10.1016/j.fcr.2014.11.010.
- Crimp S. Frost Risk on the Rise Despite Warmer Climate // Ground Cover Supplement. GRDC, Kingston, Australia, 2014. Supplement Issue: 109.

- Crimp S., Gobbet D., Thomas D., Bakar S., Nidumolu U., Hayman P., Hopwood G. Understanding frost risk in a variable and changing climate // Groundcover. Grains Research and Development Corporation, Kingston, ACT, Australia. 2013. <https://grdc.com.au/resources-and-publications/grdc-update-papers/tab-content/grdc-update-papers/2013/02/understanding-frost-risk-in-a-variable-and-changing-climate>.
- Frederiks T.M., Christopher J.T., Harvey G.L., Sutherland M.W., Borrell A.K. Current and emerging screening methods to identify post-head-emergence frost adaptation in wheat and barley // *Journal of Experimental Botany*, 2012, v. 63, iss. 15, pp. 5405–5416. DOI: 10.1093/jxb/ers215.
- Fuller M.P., Fuller A.M., Kaniouras S., Christophers J., Fredericks T. The freezing characteristics of wheat at ear emergence // *Eur. J. Agron.*, 2007, v. 26, pp. 435–441.
- Hatfield Jerry L., Prueger John H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development // *Weather and Climate Extremes*, 2015, v. 10, part A, pp. 4–10.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Zheng B., Chenu K., Fernanda Dreccer, M., Chapman, S.C. Breeding for the future: what are the potential impacts of future frost and heat events on sowing and flowering time requirements for Australian bread wheat (*Triticum aestivum*) varieties? // *Glob. Change Biol.*, 2012, no. 18, pp. 2899–2914.

References

- VMO № 49. Tekhnicheskiiy reglament. T. 1. Obshchiye meteorologicheskkiye standarty i rekomenduyemyye praktiki* [WMO Publication No. 49. Basic Documents No. 2. Volume I. General Meteorological Standards and Recommended Practices]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2015.
- Gol'tsberg I.A. *Agroklimaticheskaya kharakteristika zamorozkov v SSSR i metody bor'by s nimi* [Agroclimatic characteristics of frosts in the USSR and methods of dealing with them]. Leningrad: GMI, 1961, 198 p.
- Kononenko O.V. Osobennosti vozniknoveniya zamorozkov radiatsionnogo tipa po territorii Leningradskoy oblasti [The origin of the radiation type frosts on the territory of Leningrad region] // *Agrofizika*, 2015, no. 4, pp. 31–36.
- Kononenko O.V. Statisticheskaya struktura i zonalnoye raspredeleniye radiatsionnykh zamorozkov po territorii Severo-Zapadnogo regiona Rossii [Statistical structure and zonal distribution of radiation frosts across the territory of the North-West region of the Russian Federation] // *Agrofizika*, 2018, no. 4, pp. 59–67.
- Uskov I.B., Uskov A.O. *Osnovy adaptatsii zemledeliya k izmeneniyam klimata: Spravochnoye izdaniye*. Saint-Petersburg: «Nestor-Istoriya», 2014, 385 p.
- Chudnovskiy A.F. *Zamorozki* [Frosts]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1949, 240 p.
- Al-Issawi M., Rihan H., El-Sarkassy N., Fuller M. Frost hardness expression and characterisation in wheat at ear emergence // *J. Agron. Crop Sci.*, 2012, v. 199, pp. 66–74.
- Asseng S., Foster A.N., Turner N.C. The impact of temperature variability on wheat yields // *Glob. Change Biol.*, 2011, v. 17, pp. 997–1012.
- Barlow K.M., Christy B.P., O'Leary G.J., Riffkin P.A., Nuttall J.G. Simulating the impact of extreme heat and frost events on wheat crop production: a review // *Field Crops Res.*, 2015, v. 171, pp. 109–119. DOI: 10.1016/j.fcr.2014.11.010.
- Crimp, S. Frost Risk on the Rise Despite Warmer Climate // *Ground Cover Supplement*. GRDC, Kingston, Australia, 2014. Supplement Issue: 109.
- Crimp S., Gobbet D., Thomas D., Bakar S., Nidumolu U., Hayman P., Hopwood G. Understanding frost risk in a variable and changing climate // Groundcover. Grains Research and Development Corporation, Kingston, ACT, Australia. 2013. <https://grdc.com.au/resources-and-publications/grdc-update-papers/tab-content/grdc-update-papers/2013/02/understanding-frost-risk-in-a-variable-and-changing-climate>
- Frederiks T.M., Christopher J.T., Harvey G.L., Sutherland M.W., Borrell A.K. Current and emerging screening methods to identify post-head-emergence frost adaptation in wheat and barley // *Journal of Experimental Botany*, 2012, v. 63, iss. 15, pp. 5405–5416. DOI: 10.1093/jxb/ers215.
- Fuller M.P., Fuller A.M., Kaniouras S., Christophers J., Fredericks T. The freezing characteristics of wheat at ear emergence // *Eur. J. Agron.*, 2007, v. 26, pp. 435–441.
- Hatfield Jerry L., Prueger John H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development // *Weather and Climate Extremes*, 2015, v. 0, part A, pp. 4–10.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Zheng B., Chenu K., Fernanda Dreccer M., Chapman S. C., 2012. Breeding for the future: what are the potential impacts of future frost and heat events on sowing and flowering time requirements for Australian bread wheat (*Triticum aestivum*) varieties? // *Glob. Change Biol.*, 2012, no. 18, pp. 2899–2914.