

## Оценка повреждения ранними весенними заморозками сельскохозяйственных культур на территории Республики Беларусь с использованием данных MODIS

С.Л. Кравцов, Д.В. Голубцов, Е.Н. Лисова, Е.В. Лепесевич

*Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск, Беларусь  
E-mail: Krautsou\_sl@rambler.ru*

Начало вегетации в Республике Беларусь практически повсеместно происходит в конце апреля – начале мая. Поэтому ранние весенние заморозки считаются наиболее опасными для сельскохозяйственных культур, которые в этот период находятся в ранних фазах развития. Весенние заморозки повреждают посевы сельскохозяйственных культур, приводя к потерям значительных средств на пересев – в среднем по Республике Беларусь ежегодный пересев составляет 8–13% от общей площади посева. Потенциал повреждения посевов сельскохозяйственных культур ранними весенними заморозками наиболее высок в северной (Витебская область), центральной (граничащие районы Минской и Могилевской областей) и южной (регион Полесья – граничащие районы Брестской и Гомельской областей) частях страны. При этом степень повреждения сельскохозяйственных культур заморозками определяется прежде всего их продолжительностью и температурой. Оценка повреждения сельскохозяйственных культур ранними весенними заморозками 2000 г., 2005 г., 2007 г. и 2009 г. на территории Республики Беларусь проведена с использованием данных MODIS. В целом получено хорошее соответствие между наземными данными и результатами анализа данных MODIS, что позволяет рассматривать их в качестве возможного источника информации для оценки в масштабах страны объема ущерба и пространственного распределения повреждения заморозками сельскохозяйственных культур.

**Ключевые слова:** весенние заморозки, сельскохозяйственные культуры, данные MODIS, оценка повреждения.

### Введение

Весенние заморозки – понижение температуры воздуха до отрицательных значений, когда средняя суточная температура уже положительная. Заморозки на почве – понижение ее температуры и растений ночью до 0°C и ниже, тогда как температура воздуха, по крайней мере на высоте 2 м, остается выше 0°C.

Благоприятствующие заморозкам погодные условия (низкая влажность воздуха, слабый ветер, отсутствие облачности) создаются в антициклонах и гребнях повышенного давления. Повторяемость заморозков возрастает в долинах и низинах (задерживающих холодный воздух), областях удаленных от крупных водных объектов (смягчающих ночные температуры прилегающей местности). Возвышенности и склоны, как правило, теплее, чем ровные места, а тем более низины и замкнутые долины. Это связано с тем, что на склонах в безветренную погоду холодный воздух как более тяжелый скатывается вниз и вытесняет вверх теплый (Tait, Zheng, 2003; Warrick, Miller, 1999). Любая защита с северной стороны (лесополоса, железнодорожное полотно и др.) задерживает поступление холодного воздуха.

Весенние заморозки всякий раз повреждают сельскохозяйственные культуры, снижая урожайность и качество семян. При этом весенними заморозками могут быть повреждены огромные площади (затрагивая рыночные цены на сельскохозяйственную продукцию) или только несколько полей. Снизить потери от повреждения сельскохозяйственных культур

тур весенними заморозками возможно использованием более устойчивых сортов. Однако, чем выше устойчивость сорта – тем ниже урожайность, и наоборот. И выбирая сорта для посева, чаще жертвуют первым, надеясь на благоприятные погодные условия. В результате недооценка фактора весенних заморозков в масштабах страны сопряжена с потерями значительных средств на пересев погибших посевов сельскохозяйственных культур – в среднем по стране пересев составляет 8–13% от общей площади посева.

### **Пространственно-временной анализ ранних весенних заморозков на территории Республики Беларусь**

Ранние весенние заморозки в Республике Беларусь регистрируются ежегодно. При этом они, как правило, не охватывают одновременно более 30% территории страны. Начало вегетации (время устойчивого перехода среднесуточной температуры через  $+10^{\circ}\text{C}$ ) в Республике Беларусь практически повсеместно происходит в конце апреля – начале мая. Поэтому майские заморозки считаются наиболее опасными для сельскохозяйственных культур (Логинов, 2007).

Для оценки ситуации с заморозками в мае проанализированы данные о 299 зарегистрированных случаях (на метеостанциях регистрация проводится с интервалом 3 ч) – 184 ночи в период с 2006 г. по 2010 г. на 49 метеостанциях относительно равномерно распределенных по территории Республики Беларусь. Было принято, что значения  $T_i \leq 0^{\circ}\text{C}$  соответствуют возникновению заморозков для  $i$ -й регистрации. На метеостанциях в Витебской области был зафиксирован 81 случай с заморозками, Брестской области – 44, Гомельской – 48, Гродненской – 21, Минской – 63, Могилевской – 42. В среднем заморозки на одной и той же метеостанции отмечались около 1,2 раза в год. Вместе с тем наблюдались и аномалии, так на метеостанциях Езерище и Полесская заморозки регистрировались 2,6 раза в год; на метеостанции Нарочь – 2,4 раза; на метеостанциях Докшицы и Лынтупы – 2,2 раза.

Количество зарегистрированных на метеостанциях ночей с заморозками по годам: 7 ночей в 2006 г., 123 – в 2007 г., 45 – в 2008 г., 9 – в 2009 г. Наибольшее количество ночей с заморозками в мае зафиксировано в начале месяца (с 1 по 8) – 166. Все заморозки отмечены между 21 и 6 ч по UTC (всемирному координированному времени). В 93% случаев заморозки регистрировались при температуре приземного воздуха  $-0,1 \dots -2,6^{\circ}\text{C}$  – среднее значение  $-1,27^{\circ}\text{C}$ . По большей части заморозки возникали при штиле, западном и северо-западном направлениях ветра – 247 случаев. Заморозки обычно фиксировались при относительной влажности воздуха 50...100% – среднее значение 86,54%.

В 2006–2010 гг. повторяемость заморозков в мае относительно 1966–2004 гг. снизилась практически на всей территории Республики Беларусь (рис. 1а-б). Наибольшее снижение повторяемости заморозков произошло в Брестской и Гродненской областях. При этом сохранилась низкая повторяемость заморозков на юго-востоке страны в междуречье вблизи впадения реки Сож в реку Днепр. В целом, повторяемость заморозков на юго-западе и юго-востоке страны значительно ниже, чем в остальной ее части. Повторяемость заморозков в основном увеличивается с юга на север. Более высокая детальность карты повторяемости заморозков на рис. 1в по отношению к рис. 1б (47 относительно 26 метеостанций) позволила выявить область высокой повторяемости заморозков вблизи метеостанции Полесская (Брестская область).

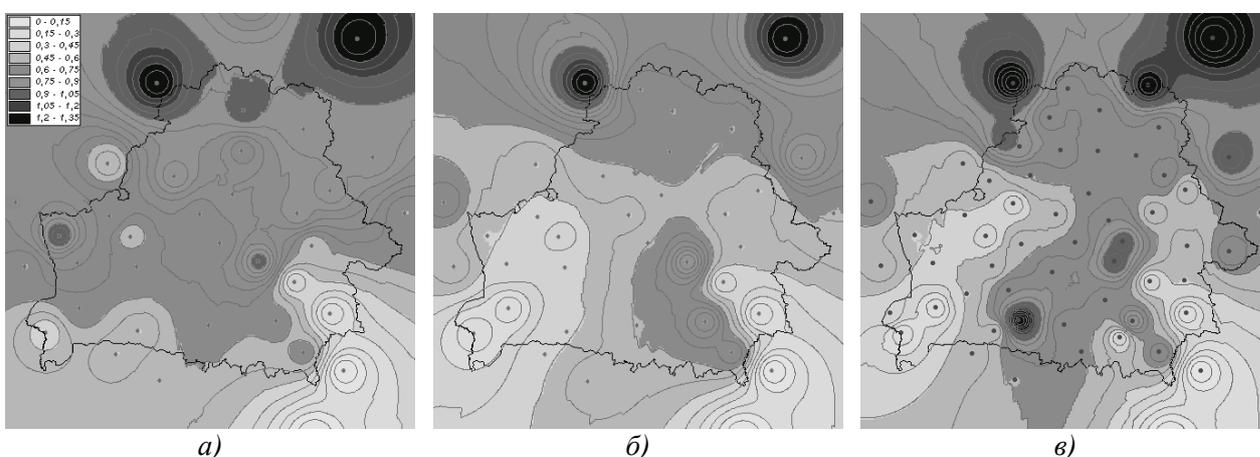


Рис. 1. Карты повторяемости заморозков в мае на территории Республики Беларусь: а) по данным за 1966–2004 гг. (с 26 метеостанций); б) по данным за 2006–2010 гг. (с 26 метеостанций); в) по данным за 2006–2010 гг. (с 47 метеостанций)

Таким образом, потенциал повреждения посевов сельскохозяйственных культур ранними весенними заморозками наиболее высок в северной (Витебская область), центральной (граничащие районы Минской и Могилевской областей) и южной (регион Полесья – граничащие районы Брестской и Гомельской областей) частях страны.

### **Повреждение заморозками сельскохозяйственных культур в ранних фазах развития**

Основу зернового хозяйства Республики Беларусь составляют такие культуры, как ячмень, пшеница, тритикале, рожь, овес, кукуруза, которые в структуре зернового клина занимают 87%. Всходы ячменя появляются на 6–7 день после сева, оптимальная температура для прорастания составляет +15...+20°C. В засушливых районах глубина сева семян ячменя составляет 6–8 см, на супесчаных почвах 5–6 см, а на тяжелых глинистых 3–4 см. При температуре почвы на глубине сева семян яровой пшеницы +5°C всходы появляются на 20 день, при +8°C – на 13 день, при +10°C – на 9 день, при +15°C – на 7 день. Опти-

мальная глубина сева семян яровой пшеницы составляет 4–5 см, при необходимости она может быть увеличена до 7–8 см. Всходы яровой ржи появляются на 7–8 день. Глубина сева семян яровой ржи в зоне достаточного увлажнения составляет 3 см. Глубина сева семян овса составляет 3–5 см, на легкосуглинистых почвах 3–4 см, супесчаных 4 см. При недостаточном увлажнении глубину сева увеличивают до 5–6 см. Всходы семян овса появляются на 6–8 день после сева. Всходы кукурузы появляются при среднесуточной температуре почвы на глубине 10 см: +8,2...+9,3°C на 26–38 день, при +12,8...+16°C на 14–22 день, при +16...+18°C на 12–13 день, при +18...+22°C на 11 день. Глубина сева семян кукурузы в зоне достаточного увлажнения составляет 4–6 см, в зоне недостаточного увлажнения – 5–8 см. В общем случае при увеличении глубины сева семян, недостаточном увлажнении почвы и невысокой температуре появление всходов задерживается.

Степень повреждения сельскохозяйственных культур заморозками определяется прежде всего их продолжительностью и температурой. Длительное воздействие вызывает более сильное повреждение, чем кратковременное воздействие той же самой температуры (Warrick, Miller, 1999). При этом повреждение происходит даже при несколько более высоких температурах с более длительным воздействием.

Посевы сельскохозяйственных культур, которые имели хорошие условия роста и плодородные почвы (особенно относительно содержания азота), более чувствительны к заморозкам из-за их хорошего развития и высокого содержания воды. С другой стороны засуха повышает стойкость растений к холоду, уменьшая содержание в них воды и степень повреждения заморозками (Warrick, Miller, 1999). Обильное увлажнение почвы, холодные температуры и плодородные почвы замедляют наступление зрелости растений, что уменьшает их устойчивость к заморозкам по сравнению с растениями, которые имели менее благоприятные условия роста и находились в более высокой фазе развития во время заморозков.

Весенние заморозки опасны для сельскохозяйственных культур в ранних фазах их развития. Так заморозки интенсивностью –2...–3°C приводят к гибели всходов кукурузы (табл. 1), интенсивностью –3...–8°C – всходов рапса и ячменя.

Таблица 1. Устойчивость к заморозкам сельскохозяйственных культур в фазе всходов-кущения (по данным Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по земледелию)

Культура	Повреждение и частичная гибель растений, °C	Гибель большинства растений, °C
Пшеница	–9...–10	–10...–12
Овес	–8...–9	–8...–11
Ячмень	–7...–8	–8...–10
Рапс яровой	–3...–5	–6...–8
Кукуруза	–2...–3	–3

Кроме самых серьезных заморозков урожай поврежденных посевов сельскохозяйственных культур часто окупает затраты на его уборку и перевозку (Warrick, Miller, 1999). Частично поврежденные заморозками посевы культур подлежат уплотнению, тогда как чрезмерно поврежденные (остается менее 130 растений на 1 м<sup>2</sup> для озимой ржи, менее 100 растений для пшеницы и тритикале), как правило, пересеваются.

### **Оценка повреждения сельскохозяйственных культур ранними весенними заморозками на территории Республики Беларусь по данным MODIS**

*Рассматриваемые заморозки.* Рассматривались ранние весенние (конец апреля – начало мая) заморозки 2000 г., 2005 г., 2007 г. и 2009 г. Сев яровых сельскохозяйственных культур по Республике Беларусь в 2000 г. был практически завершен к 04 мая, в 2005 г. – к 07 мая, в 2007 г. – к 12 апреля, в 2009 г. – к 25 апреля. В целом интервал времени от сева яровых культур до ранних весенних заморозков в 2000 г. составил 10...20 дней, в 2005 г. – 15...25 дней, в 2007 г. – 20...28 дней, в 2009 г. – 7...9 дней. В результате этого в 2000 г. интенсивные и продолжительные заморозки оказались особенно неблагоприятными после теплого апреля, высокие температуры которого способствовали ранней вегетации (*табл. 2*). В 2009 г. яровые культуры к моменту заморозков (озимые культуры после холодного апреля были к ним менее чувствительны) взошли лишь местами по стране, вследствие чего ранними весенними заморозками были повреждены или уничтожены посевы сельскохозяйственных культур на весьма небольшой площади (*табл. 2*).

В качестве наземной информации использовались официальные данные: Национального статистического комитета Республики Беларусь, отдела агрометеорологических прогнозов Государственного учреждения «Республиканский метеорологический центр», Государственного учреждения «Главная государственная инспекция по семеноводству, карантину и защите растений». Следует отметить, что официальные данные представляют собой обобщение на уровне страны.

*Данные MODIS.* Для оценки повреждения сельскохозяйственных культур ранними весенними заморозками в масштабе всей страны использовались (*табл. 3*) разновременные (до и после даты заморозков) данные MODIS (16-дневные композиции NDVI с пространственным разрешением 250 м). Радиометрически нормализованные данные MODIS свободно доступны с сайта компании U.S. Geological Survey.

Таблица 2. Данные по повреждению сельскохозяйственных культур ранними весенними заморозками на территории Республики Беларусь

Общая характеристика	Повреждение сельскохозяйственных культур
2000 г. В первой половине мая преобладали низкие температуры с частыми ночными заморозками. Они охватывали большую часть страны: температура воздуха опускалась до $-1...-2^{\circ}\text{C}$ , а в отдельных случаях до $-4...-6^{\circ}\text{C}$ . Наиболее низкие температуры фиксировались на торфяниках Полесья. Так на метеостанции «Полесская» Лунинецкого района в ночь со 2 на 3 мая на высоте 10 см от поверхности почвы зафиксирована температура воздуха $-15,5^{\circ}\text{C}$ .	Заморозки вызвали повреждения и гибель на больших площадях посевов зерновых культур (особенно на торфяниках и низких местах), трав сенокосов и пастбищ. Всего повреждено 196 тыс. га посевов. Погибшие посевы озимых культур убраны на зеленый корм, пересеяно 79 тыс. га посевов, остальные поврежденные посевы подкормлены минеральными удобрениями.
2005 г. В конце первой половины мая температура воздуха понизилась до $0...+5^{\circ}\text{C}$ , местами на почве (прежде всего на торфяниках Брестской области) наблюдались заморозки до $0...-2^{\circ}\text{C}$ .	В результате экстремальных погодных условий (проливных дождей с заморозками) повреждено 162 тыс. га посевов, погибло 70 тыс. га озимых и яровых культур. Больше всего пострадали хозяйства Гродненской, Витебской и Могилевской областей. Пересеяно 73 тыс. га посевов, остальные поврежденные посевы уплотнены однолетними культурами.
2007 г. В первой декаде мая средняя температура воздуха составила $+7,4^{\circ}\text{C}$ , что на $3,7^{\circ}\text{C}$ ниже нормы. В ночные часы в воздухе и на поверхности почвы отмечались заморозки до $0...-4^{\circ}\text{C}$ , местами в Полесье поверхность осушенных торфяников охлаждалась до $-6^{\circ}\text{C}$ . Последние заморозки отмечались 6 мая.	Весенними заморозками в конце апреля – начале мая повреждено около 35 тыс. га посевов. В основном пострадали посевы на мелиорированных землях Полесья – в восточных районах Брестской области (Ганцевичском, Лунинецком и Столинском районах) и Гомельской области (около 10% от всей площади посевов). На небольших площадях отмечена гибель яровых культур. Часть посевов была пересеяна.
2009 г. В наиболее холодные ночи 2 и 3 мая во многих регионах на почве и местами в воздухе, а в конце первой и в середине второй декады кое-где, в основном в приземном слое на высоте 2 см от поверхности почвы, отмечались заморозки до $-1...-3^{\circ}\text{C}$ , на торфяниках Полесья до $-4^{\circ}\text{C}$ .	В большинстве областей страны поврежденный посевов весенними заморозками в конце апреля – начале мая не отмечено, озимые и яровые были повреждены лишь на отдельных низинных участках Полесья. Часть посевов была пересеяна.

Таблица 3. Данные MODIS, использованные для оценки повреждения сельскохозяйственных культур ранними весенними заморозками на территории Республики Беларусь

Даты заморозков	Данные MODIS	
	до	после
03.05.2000–15.05.2000	08.05.2000	09.06.2000
11.05.2005–15.05.2005	09.05.2005	10.06.2005
01.05.2007–07.05.2007	23.04.2007	25.05.2007
03.05.2009	23.04.2009	25.05.2009

*Области сельскохозяйственных угодий.* Оценка повреждения сельскохозяйственных культур ранними весенними заморозками в масштабе всей страны проведена только для области сельскохозяйственных угодий (пашен, пастбищ и др. используемых в расте-

ниеводстве земель). Для ее извлечения использовалась свободно доступная База данных Глобального растительного покрова 2000 (GLC2000), созданная Группой мониторинга глобального растительного покрова Объединенного центра исследований Европейского Союза совместно с партнерами из различных стран мира (Bartalev et al., 2003). Пространственное разрешение базы данных GLC2000 составляет 1 км.

*Оценка повреждения сельскохозяйственных культур заморозками.* В исследовании состояния растений наибольшее распространение получили два вегетационных индекса: нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI и улучшенный вегетационный индекс EVI. NDVI более чувствителен к содержанию хлорофилла и насыщается при высокой биомассе, тогда как EVI более отзывчив к изменениям структуры покрова и имеет улучшенную чувствительность в областях высокой биомассы. В этой связи, для оценки повреждения сельскохозяйственных культур ранними весенними заморозками (низкая биомасса) было вычислено изменение значения NDVI (Tan et al., 2009):

$$\Delta NDVI_{(x,y)} = NDVI_{t_2,(x,y)} - NDVI_{t_1,(x,y)},$$

где  $\Delta NDVI_{(x,y)}$  – изменение значения NDVI для пикселя  $(x, y)$  изображения;  $NDVI_{t_1,(x,y)}$  – значение NDVI до заморозков для пикселя  $(x, y)$  изображения;  $NDVI_{t_2,(x,y)}$  – значение NDVI после заморозков для пикселя  $(x, y)$  изображения.

Считалось, что при  $\Delta NDVI_{(x,y)} > 0$  сельскохозяйственная культура не повреждена заморозками, при  $\Delta NDVI_{(x,y)} = 0$  рост сельскохозяйственной культуры подавлен, при  $\Delta NDVI_{(x,y)} < 0$  сельскохозяйственная культура повреждена заморозками (Feng et al., 2009). Чем меньше значение  $\Delta NDVI_{(x,y)}$ , тем выше степень повреждения сельскохозяйственной культуры заморозками: заморозки могут приводить к снижению роста биомассы, отмиранию отдельных их зеленых фракций или полной гибели растений, что уменьшает значение NDVI.

*Анализ результатов.* Врожденная природная пространственная изменчивость заморозков, неоднородность увлажнения и типов почвы, а также различие видов, сортов и даты сева сельскохозяйственных культур вызывают отчетливое пространственное различие их повреждения на территории Республики Беларусь (рис. 2).

Если заморозки были сосредоточены в ограниченном временном интервале (до половины месяца), то наблюдалось достаточно хорошее соответствие (точность около 80%) между наземными данными и результатами анализа данных MODIS на всем диапазоне значений (высоких, средних и низких) площади повреждения сельскохозяйственных культур (табл. 4 и 2). Это в определенной степени обусловлено тем, что неточность результатов для отдельных регионов нивелируется при обобщении в масштабе всей страны. Расхождение указанных данных обусловлено принятой схемой обработки исходной информации (единая

для всей области сельскохозяйственных угодий страны), несоответствием пространственного разрешения данных MODIS среднему размеру полей, недостаточным качеством наземных данных, а также неоптимальностью дат получения спутниковых данных.

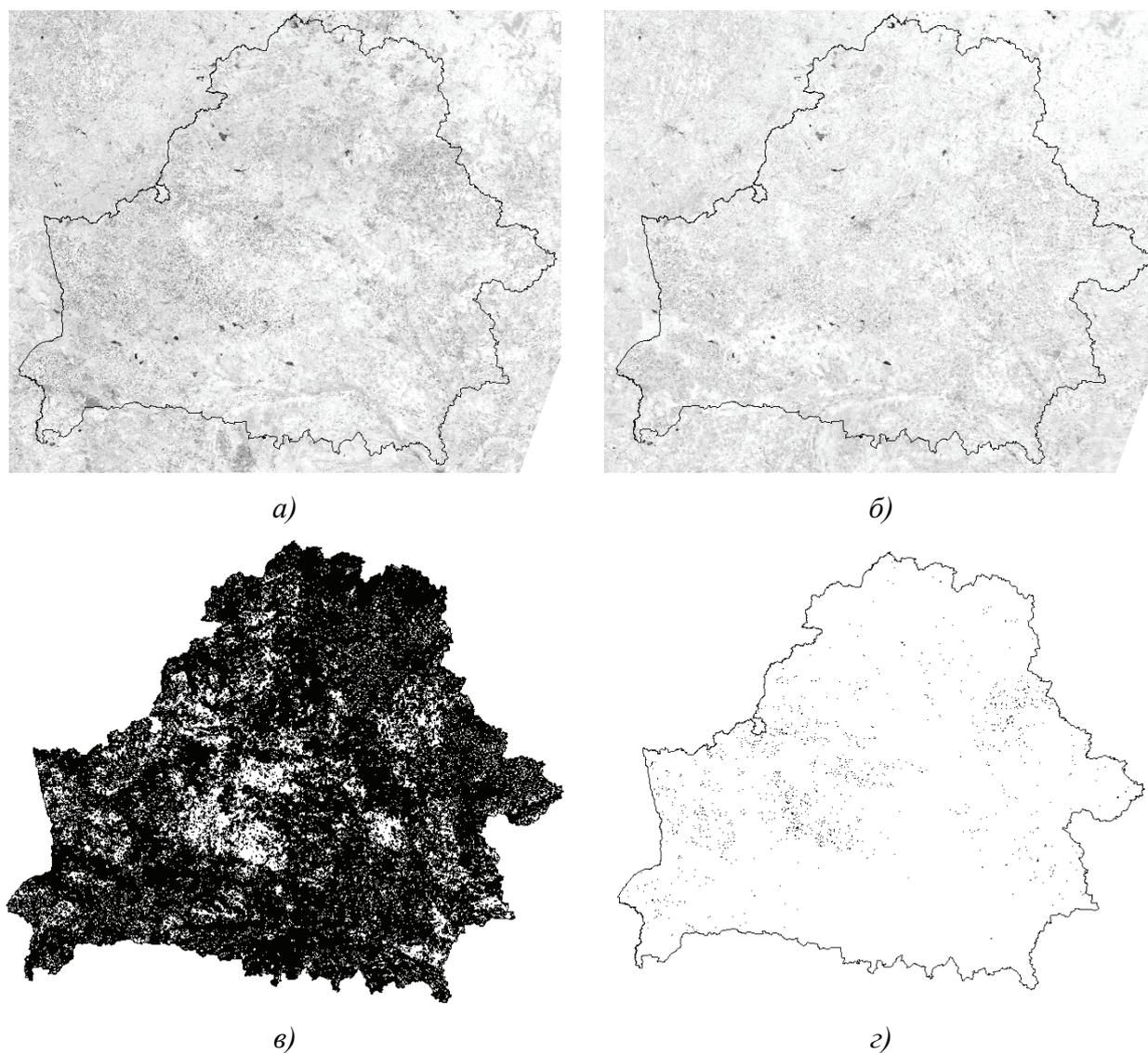


Рис. 2. Оценка повреждения сельскохозяйственных культур ранними весенними заморозками 2005 г. по данным MODIS: а) 16-дневная композиция индекса NDVI (09 мая 2005 г.); б) (10 июня 2005 г.); в) область сельскохозяйственных угодий (белый цвет) в соответствии с Базой данных GLC2000; г) повреждение сельскохозяйственных культур ранними весенними заморозками 2005 г.

Таблица 4. Результаты оценки повреждения сельскохозяйственных культур ранними весенними заморозками на территории Республики Беларусь по данным MODIS

Год	Площадь повреждения сельскохозяйственных культур, га	Погрешность оценки повреждения сельскохозяйственных культур	
		га	%
2000 г.	160 025	35 975	22,2
2005 г.	141 125	20 875	12,9
2007 г.	39 650	4 650	13,3
2009 г.	7 550	—	—

Сложности возникают тогда, когда весенние заморозки наступают «волнами» на достаточно длительном временном интервале, как, например, это было в 2004 г. Тогда фиксировалось три «волны» весенних заморозков: в первой декаде мая, в третьей декаде мая и в первой декаде июня. В указанном случае оценка площади повреждения сельскохозяйственных культур затруднена адекватным выбором спутниковых данных MODIS (16-дневных композиций индекса NDVI).

### Заключение

Весенние заморозки повреждают посевы сельскохозяйственных культур, приводя к потерям значительных средств на пересев – в среднем по Республике Беларусь ежегодный пересев составляет 8–13% от общей площади посева. Использование данных MODIS позволяет в масштабах страны оценить объем ущерба и пространственное распределение повреждения заморозками сельскохозяйственных культур. В результате внедрение в практику методов дистанционного зондирования для оценки повреждения весенними заморозками сельскохозяйственных культур может иметь важное экономическое значение, способствуя рационализации: страховых выплат и самой системы страхования (вследствие наносимого сельскохозяйственным культурам ущерба), выделения из резервного фонда семян и топлива на уплотнение и пересев погибших посевов, проведения их фитосанитарного обследования и др. Вместе с тем, для указанного внедрения потребуется значительно улучшить качество и оперативность наземных данных, получаемых разными организациями (да к тому же разной ведомственной принадлежности) в масштабе всей страны.

### Литература

1. *Логинов В.Ф., Микуцкий В.С., Кузнецов Г.П.* Статистико-вероятностный анализ заморозков в Беларуси // Метеорология и гидрология. 2007. № 10. С. 66–74.
2. *Bartalev S.A., Belward A.S., Erchov D.V., Isaev A.S.* A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia // INT. J. Remote sensing. 2003. Vol. 24. No. 9. P. 1977–1982.
3. *Feng M.-C., Yang W.-D., Cao L.-L., Ding G.-W.* Monitoring winter wheat freeze injury using multi-temporal MODIS data // Agricultural sciences in China. 2009. Vol. 8. Issue 9. P. 1053–1062.
4. *Tait A., Zheng X.* Mapping frost occurrence using satellite data // American meteorological society. 2003. Vol. 29. No. 3. P. 193–203.
5. *Tan Z., Ding M., Yang X., Ou Z.* Monitoring freeze injury and evaluating losing to sugar-cane using RS and GPS // Computer and computing technologies in agriculture II. Springer. 2009. Vol. 1. P. 307–316.
6. *Warrick B.E., Miller T.D.* Freeze injury on wheat. Texas agricultural extension service. 1999. 10 p.

# The use of MODIS data for estimation of agricultural crops damage on the territory of the Republic of Belarus by early spring frosts

S.L. Krautsou, D.V. Golubtsov, A.M. Lisava, K.V. Lepiasevich

*United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus  
Belarus, Minsk*

*E-mail: Krautsou\_sl@rambler.ru*

The start of growing period in the Republic of Belarus practically everywhere occurs at the end of April – the beginning of May. Therefore early spring frosts are the most dangerous for crops which during this period are in early stages of growth. Spring frosts damage the crops, that leads to losses of considerable means for reseeding – on the average in the Republic of Belarus annual reseeding is 8–13% of the total area of crops. Potential of crops damage by early spring frosts is the highest in the northern (Vitebsk region), central (adjoining areas of the Minsk and Mogilev regions) and southern (the area of Polesye – adjoining areas of the Brest and Gomel regions) parts of the country. The degree of crops damage by spring frosts is influenced by the duration of the low temperatures as well as the low point they reach. The assessment of crops damage by early spring frosts of 2000, 2005, 2007 and 2009 on the territory of the Republic of Belarus is carried out with use of MODIS data. A good similarity between ground data and results of the analysis of MODIS data is received. That allows to consider them as a possible source of information for an assessment of damage volume and spatial distribution of crops damage by frosts for the whole country.

**Keywords:** spring frosts, agricultural crops, MODIS data, estimation of damage.

## References

1. Loginov V.F., Mikutskii V.S., Kuznetsov G.P., Statistiko-veroyatnostnyi analiz zamorozkov v Belarusi (Statistiko-veroyatnostny freeze analysis in Belarus), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2007, No. 10, pp. 66–74.
2. Bartalev S.A., Belward A.S., Erchov D.V., Isaev A.S. A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia, *INT. J. Remote sensing*, 2003, Vol. 24, No. 9, pp. 1977–1982.
3. Feng M.-C., Yang W.-D., Cao L.-L., Ding G.-W., Monitoring winter wheat freeze injury using multi-temporal MODIS data, *Agricultural sciences in China*, 2009, Vol. 8, Issue 9, pp. 1053–1062.
4. Tait A., Zheng X., Mapping frost occurrence using satellite data, *American meteorological society*, 2003, Vol. 29, No. 3, pp. 193–203.
5. Tan Z., Ding M., Yang X., Ou Z., Monitoring freeze injury and evaluating losing to sugar-cane using RS and GPS, Computer and computing technologies in agriculture II, *Springer*, 2009, Vol. 1, pp. 307–316.
6. Warrick B.E., Miller T.D., Freeze injury on wheat, *Texas agricultural extension service*, 1999, 10 p.