

УДК 551.507.362.2:551.5:633&lt;&lt;324&gt;&gt;(470.325)

## Исследование условий зимовки озимых на основе спутниковых данных и метеорологических наблюдений (на примере Белгородской области)

Э. А. Терехин\*

*Предложена методика оценки условий зимовки озимых культур с точностью до отдельных посевных площадей на основе совместного использования данных дистанционного зондирования Земли и метеорологической информации. Получена зависимость между высотой снежного покрова и его коэффициентом отражения в красном диапазоне спектра (данные MOD09GQ). Геоинформационное картографирование условий зимовки озимых культур, выращиваемых на территории Белгородской области, проведено на примере зимнего периода 2012/13 г.*

**Ключевые слова:** озимые зерновые культуры, условия зимовки, MODIS, температура воздуха, высота снежного покрова, коэффициент отражения, температура почвы на глубине узла кушения.

### 1. Введение

Оценка условий зимовки озимых зерновых культур является актуальной задачей для Белгородской области и Центрального Черноземья, где озимые занимают более трети посевных площадей, а зимой температура воздуха в отдельные дни может опускаться до  $-20^{\circ}\text{C}$  [1]. Из озимых культур на территории Белгородской области выращивают пшеницу озимую, рожь и тритикале, причем посевы озимой пшеницы составляют подавляющее большинство.

Условия перезимовки в значительной степени влияют на урожайность озимых культур [2], в связи с чем их изучение является актуальной задачей для регионов, где озимые зерновые занимают значительные площади. Основными факторами, определяющими условия зимовки озимых на территории Центрального Черноземья, являются температура воздуха и состояние снежного покрова [3]. Эти факторы определяют температуру почвы на глубине узла кушения озимых, которая составляет 3 см [13]. При переходе температуры на глубине узла кушения через порог  $-10^{\circ}\text{C}$  в сторону более низких значений погибает более 50% растений. Наличие снежного покрова на полях сглаживает негативное воздействие отрицательной температуры, в связи с чем его мониторинг является ключевой задачей с точки зрения анализа условий зимовки посевов.

Спутниковые изображения благодаря одновременному охвату значительных территорий, растущему качеству и периодичности получения

\* Белгородский государственный национальный исследовательский университет; e-mail: terekhin@bsu.edu.ru.

представляют практически безальтернативный источник информации для картографирования снежного покрова [15, 20]. Снимки среднего пространственного разрешения, получаемые аппаратурой MODIS, характеризуются большим охватом территории и высокой частотой получения, что крайне важно для мониторинга посевов [11]. В связи с этим представляет интерес оценить возможности их использования для изучения территориальных характеристик снежного покрова [14, 16, 22]. При этом для анализа условий зимовки посевов необходимы сведения о состоянии снежного покрова на конкретные даты.

К настоящему времени уже исследована зависимость урожая озимых культур и их условий зимовки от агрометеорологических факторов [6, 7], но проблема оценки условий зимовки озимых на основе спутниковых данных во многом остается актуальной. В то же время уже проведен ряд успешных исследований, включающих разработку методик, использующих спутниковые снимки для анализа зимовки посевов [9] и проведение тематического картографирования условий зимовки озимых для отдельных регионов [8]. Тем не менее задача оценки условий зимовки озимых культур с применением спутниковой информации остается важной с точки зрения разработки подходов по картографированию отдельных факторов, влияющих на зимовку посевов, например снежного покрова, и повышения точности проводимых оценок.

В настоящей статье представлены результаты исследований количественных характеристик снежного покрова на основе спутниковой информации, а также пример оценки и геоинформационного картографирования условий зимовки озимых культур с применением спутниковых данных как для отдельных административно-территориальных единиц, так и для конкретных сельскохозяйственных полей Белгородской области в зимний период 2012/13 г.

## 2. Материалы

Основные факторы, влияющие на условия зимовки озимых, — это температура воздуха и высота снежного покрова, так как они определяют температуру почвы на глубине узла кущения и могут быть использованы для выявления критических значений температуры (ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ ) на этой глубине. Для выполнения исследования были обработаны и проанализированы метеорологические данные о минимальной суточной температуре за каждый день зимнего периода с отрицательной температурой воздуха [10] со всех метеостанций, расположенных на рассматриваемой территории, сведения об облачности на каждый день этого периода и высоте снежного покрова (для верификации информации о характеристиках снега, получаемой по спутниковым данным), а также ежедневно получаемые изображения MOD09GQ, содержащие коэффициенты отражения земной поверхности в красной и ближней инфракрасной областях спектра [17].

Исследование предусматривало максимально возможную детальность при оценке условий зимовки озимых (до уровня конкретного сельскохозяйственного поля), поэтому на основе снимков SPOT-5 (пространственное разрешение 5 м/пиксель) был создан векторный слой всех посевных площадей Белгородской области. Он включал контуры свыше 30 000 сельско-

хозяйственных полей региона и был подготовлен для создания региональной системы мониторинга посевных площадей и изучения закономерностей развития посевов на территории Белгородской области. Применение векторного слоя контуров посевных площадей позволило рассчитать и проанализировать спектральные характеристики для каждого сельскохозяйственного поля и, соответственно, на их основе получить информацию о снежном покрове.

### 3. Методика исследования и результаты

Принципиальная схема исследования включала следующие этапы.

**Анализ метеорологических данных.** Исходя из того, что температура воздуха ниже  $-10^{\circ}\text{C}$  в отсутствие снежного покрова может представлять опасность для озимых на глубине узла кущения, для зимы 2012/13 г. были выявлены периоды, в которые на территории Белгородской области наблюдались такие значения температуры. За период с 1 октября 2012 г. по 31 марта 2013 г. были построены и проанализированы ряды минимальных значений температуры на каждую дату для метеостанций, расположенных на территории Белгородской области и вблизи нее. Анализ метеорологических данных показал, что периоды времени с критическими отрицательными значениями температуры (ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ ) оказались примерно одни и те же для большинства метеостанций. Это обусловлено тем, что территория Белгородской области располагается в одной климатической зоне. Например, в период с 14 по 26 декабря 2012 г. очень низкие (и при этом примерно одинаковые) суточные значения температуры наблюдались одновременно на метеостанциях Новый Оскол, Старый Оскол, Обоянь, Готня, Белгород, Богородицкое, Валуйки, Троицкое, Лиски, т. е. на всех основных метеостанциях Белгородской области и метеостанциях, расположенных вблизи нее. Периоды, в которые наблюдались опасные значения минимальных суточных значений температуры воздуха (ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ ) для зимы 2012/13 г. следующие: 14—26 декабря 2012 г. (минимальная температура  $-25^{\circ}\text{C}$ ), 9—16 января 2013 г. ( $-17^{\circ}\text{C}$ ), 22—27 января 2013 г. ( $-20^{\circ}\text{C}$ ), 17—27 февраля 2013 г. ( $-19^{\circ}\text{C}$ ), 25—29 марта 2013 г. ( $-17^{\circ}\text{C}$ ).

Выявленные периоды послужили основой для подбора спутниковых данных и последующего анализа температуры почвы на глубине узла кущения озимых. Для каждого из периодов, в которые минимальная суточная температура воздуха была ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ , были подобраны и проанализированы спутниковые данные с целью оценки состояния снежного покрова.

**Подбор спутниковой информации.** Для анализа снежного покрова в периоды, когда минимальные суточные значения температуры воздуха опускались ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ , были использованы информационные продукты MOD09GQ, создаваемые на основе ежедневно получаемых снимков MODIS [17]. Продукты MOD09GQ представляют ежедневные значения коэффициентов отражения в красной (620—670 нм) и ближней инфракрасной (841—876 нм) областях спектра.

Необходимо отметить, что оценка характеристик снежного покрова на конкретную дату по спутниковым данным связана с рядом проблем.

Основная из них обусловлена тем, что в зимний период значительную часть дней над территорией Белгородской области наблюдается высокая облачность и подборка безоблачного снимка часто затруднительна. Например, зимой 2012/13 г. для двух из пяти выделенных периодов, когда на территории Белгородской области температура воздуха была ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ , — 22—27 января и 25—29 марта 2013 г. — подобрать безоблачные изображения, пригодные для анализа снежного покрова, не удалось.

С другой стороны, наличие периодов с непрерывно фиксируемыми отрицательными значениями температуры воздуха обеспечивает условия сохранения снежного покрова, что позволяет использовать спутниковые снимки, полученные необязательно на необходимую дату, а близкие к ней. Например, для анализа снежного покрова на территории Белгородской области в период с 14 по 26 декабря 2012 г. достаточно хотя бы одного безоблачного снимка, так как в этот период суточные значения температуры не поднимались выше  $-9,5^{\circ}\text{C}$ , что должно было способствовать сохранению снежного покрова. Подборка безоблачных изображений MOD09GQ была проведена на основе метеорологических данных путем выявления безоблачных дней таким образом, что метеорологические условия (в первую очередь, связанные с отсутствием облачности) на каждую анализируемую дату были аналогичны.

#### **Картографирование снежного покрова на основе спутниковых данных.**

Одна из основных задач исследования заключалась в картографировании снежного покрова на основе спутниковой информации. Для дешифрирования снежного покрова могут быть использованы значения его коэффициентов отражения в видимой и ближней инфракрасной зонах спектра, значения индекса NDVI [5, 19, 21], а также значения спектрального индекса NDSI [18]. Индекс NDSI широко используется для детектирования снежного покрова. Однако для его расчета необходимы коэффициенты отражения в зеленом ( $0,565$ — $0,545$  мкм) и среднем инфракрасном диапазонах спектра ( $1,652$ — $1,628$  мкм), соответствующих каналам 4 и 6 сенсора MODIS, которые имеют пространственное разрешение 500 м. Этого разрешения недостаточно для решения задач, поставленных в настоящем исследовании. Кроме того, анализ условий зимовки озимых культур требовал сведений не только о наличии, но и о высоте снежного покрова на конкретных посевных площадях.

Проблема анализа высоты снежного покрова в отличие от задачи простого картографирования снежного покрова является более сложной [4], так как требует достоверной исходной количественной информации. В связи с тем, что решение задачи заключалось в количественной оценке влияния высоты снега на его спектральный отклик, было необходимо проанализировать возможности вычисления высоты снежного покрова на основе его коэффициентов отражения. Физической основой дешифрирования снежного покрова могут выступать его большие коэффициенты отражения в красной ( $0,620$ — $0,670$  мкм) и ближней инфракрасной областях спектра ( $0,841$ — $0,876$  мкм). В этих диапазонах снежный покров имеет значительно бóльшие коэффициенты отражения, чем остальные типы объектов земной поверхности. Эта особенность снега теоретически должна позволять достаточно уверенно проводить его дешифрирование.

Для решения задачи картографирования снежного покрова в настоящем исследовании были использованы коэффициенты отражения в красной зоне спектра (0,620—0,670 мкм) в связи с тем, что на этом участке электромагнитного излучения снежный покров выделяется наиболее контрастно от остальных типов объектов земной поверхности. Количественная оценка связи высоты снежного покрова и значений его коэффициентов отражения была выполнена на основе информации о реальной высоте снежного покрова, определенной на метеостанциях на территории Белгородской области и вблизи нее, и коэффициентов отражения снега в красной зоне спектра. Коэффициенты отражения снежного покрова вычислялись методом зональной статистики путем их усреднения внутри контуров посевных площадей.

Плотность расположения метеостанций, ведущих подробный учет данных о снежном покрове, на территории исследования не очень высока. Тем не менее были проанализированы сведения о высоте снежного покрова со всех 10 метеостанций, проводящих ее ежедневные измерения. Точность оценки высоты снежного покрова соответствовала точности метеорологических измерений. Для вычисления уравнения связи между высотой снежного покрова и его коэффициентами отражения в красной спектральной зоне были использованы данные о высоте снежного покрова четырех зимних периодов с 2010 по 2014 г. Анализируемая выборка включала информацию о высоте снежного покрова за 12 дат: 19 января, 18 февраля, 9 марта, 24 ноября 2011 г., 12 февраля, 8 марта, 16 декабря 2012 г., 15 января, 25 февраля, 11 декабря 2013 г., 21, 25 января 2014 г. с десяти метеостанций. Сведения о высоте снежного покрова были интегрированы в ГИС-проекте, подготовленном в программе ArcGIS, с данными о коэффициентах отражения снежного покрова, извлеченных из продуктов MOD09GQ.

Кроме того, для анализа значений коэффициентов отражения, соответствующих снежному покрову на изображениях MOD09GQ, было проведено сопоставление данных MOD09GQ с изображениями со спутника "Landsat-7", на которых снежный покров дешифрируется очень достоверно. Снимки Landsat 7 ETM+, имеющие пространственное разрешение 15—30 м/пиксель, позволяют уверенно проводить дешифрирование снежного покрова на конкретных посевных площадях. Для оценки наличия и состояния снежного покрова на основе снимков Landsat TM, ETM+ может быть эффективно использована комбинация каналов 4, 3, 2 (0,75—0,90, 0,63—0,69, 0,52—0,60 мкм). В этой комбинации эффективно дешифрируется как плотный снежный покров, так и разреженный, либо его отсутствие. В случае отсутствия снежного покрова на полях либо его фрагментированности уверенно дешифрируются как оголенная почва, так и озимые культуры, выступающие из-под снега. Исследование по сопоставлению значений коэффициентов отражения снежного покрова на снимках высокого и среднего пространственного разрешения было выполнено на основе анализа данных Landsat ETM+ за 23 февраля 2013 г. и данных MOD09GQ за 25 февраля 2013 г.

Количественная оценка связи между высотой снежного покрова  $s$  (см) и его коэффициентом отражения в красной спектральной зоне (0,620—

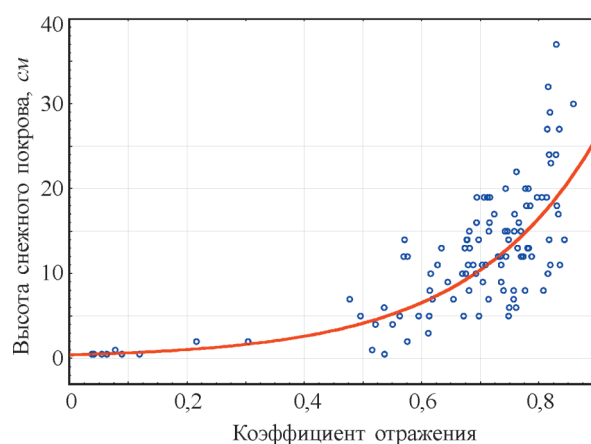


Рис. 1. График зависимости между высотой снежного покрова и коэффициентом отражения в красной зоне спектра (0,620—0,670 мкм).

Уравнение связи:  $y = 0,4117\exp(4,6136x)$ .

0,670 мкм)  $A_{\text{red}}$  показала, что зависимость между этими параметрами имеет экспоненциальный вид (рис. 1):

$$s = 0,4117\exp(4,6136A_{\text{red}})$$

(уровень значимости 0,05). Коэффициент корреляции составил 0,87, коэффициент детерминации — 0,76. Стандартная ошибка оценки высоты снежного покрова — 1,6 см.

Применение установленной зависимости позволило выполнить геоинформационное картографирование высоты снежного покрова для всей территории Белгородской области на каждую анализируемую дату. Соответственно использование векторного слоя контуров посевных площадей позволило оценить с помощью методов геоинформационного анализа высоту снежного покрова для каждого анализируемого сельскохозяйственного поля на все сроки морозного периода, в которые наблюдались критические отрицательные значения температуры (на примере зимнего периода 2012/13 г.). Кроме того, были получены усредненные характеристики снежного покрова для каждого административного района Белгородской области.

**Картографирование температуры на глубине узла кущения.** При выполнении картографирования условий зимовки озимых культур исходили из того, что критическая температура почвы на глубине залегания узла кущения озимых для условий лесостепи и степи составляет  $-10...-11^{\circ}\text{C}$  [2]. Расчет температуры почвы  $T_{\text{п}}$  на глубине узла кущения озимых был выполнен на основе уравнений, описывающих ее зависимость от температуры воздуха  $T_{\text{в}}$  и высоты снежного покрова  $s$  [8, 12]:

$$T_{\text{п}} = 0,0015s^2 + 0,208s - 8,9714 \quad \text{при } T_{\text{в}} = -10...-15 \text{ C,}$$

$$T_{\text{п}} = 0,0017s^2 + 0,225s - 12,012 \quad \text{при } T_{\text{в}} = -15...- \text{ C,}$$

$$T_{\text{п}} = 0,002s^2 + 0,265s - 14,788 \quad \text{при } T_{\text{в}} = -20...-30 \text{ C,}$$

Необходимая информация о высоте снежного покрова была получена предыдущем этапе на основе данных MOD09GQ, а конкретный тип уравнения был подобран исходя из диапазона отрицательных значений температуры воздуха на анализируемый период.

**Картографирование условий зимовки.** Картографирование условий зимовки было выполнено по следующим категориям: благоприятные, удовлетворительные, неудовлетворительные. При оценке условий зимовки озимых исходили из того, что благоприятные условия зимовки характеризуются температурой на глубине узла кушения выше  $-8^{\circ}\text{C}$ , для удовлетворительных условий характерна температура выше  $-10^{\circ}\text{C}$ , но ниже  $-8^{\circ}\text{C}$ , для неблагоприятных условий — ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ . Исходя из этих критериев был выполнен анализ условий зимовки озимых для конкретных посевных площадей. Так, получено следующее распределение числа сельскохозяйственных полей в Белгородской области, различающихся по условиям зимовки для озимых культур зимой 2012/13 г.:

Период	16 XII 2012 г.	15 I 2013 г.	25 II 2013 г.
Условия зимовки благоприятные	2860	0	23395
удовлетворительные	12883	17676	6859
неудовлетворительные	14511	12578	0

Пример картографирования соотношения числа полей с разными условиями зимовки озимых культур в административных районах Белгородской области приведен на рис. 2. Применяемый метод анализа условий зи-

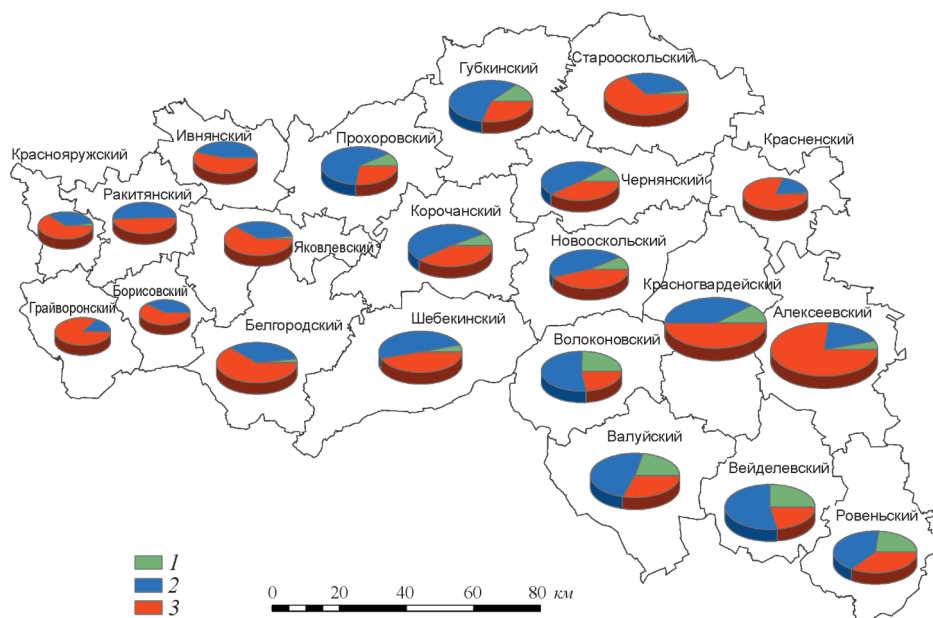


Рис. 2. Картограмма, характеризующая соотношение числа сельскохозяйственных полей в районах Белгородской области, различающихся по условиям зимовки озимых культур, на 16 декабря 2012 г.

1 — благоприятные условия, 2 — удовлетворительные, 3 — неудовлетворительные. Размер диаграмм пропорционален числу полей в административных районах.

мовки озимых позволяет проводить их оценку для всех посевных площадей территории, на которых потенциально могут присутствовать озимые культуры, т. е. он не требует дешифрирования посевов самих озимых культур.

#### 4. Заключение

Таким образом, проведена количественная оценка связи между высотой снежного покрова и значениями его коэффициента отражения в красной зоне спектра, полученными на основе изображений MOD09GQ; зависимость имеет вид, близкий к экспоненциальному. Предложена методика геоинформационного картографирования высоты снежного покрова на территории региона с точностью до отдельных посевных площадей. На ее основе проведена оценка высоты снежного покрова для более 30 000 (98,4%) посевных площадей Белгородской области на примере зимнего периода 2012/13 г. Преимущество методики заключается в высокой детальности оценки и возможности применения оперативно получаемых спутниковых данных. Ограничения методики связаны с использованием спутниковых данных среднего пространственного разрешения, что сокращает возможности оценки спектральных характеристик небольших по размеру полей, площадью 15—20 га.

На основе результатов анализа снежного покрова и метеоданных о минимальных отрицательных суточных значениях температуры воздуха выполнен анализ условий зимовки озимых культур на территории Белгородской области на примере зимнего периода 2012/13 г. для каждого административного района Белгородской области.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации № 5.78.2014/К.

#### Литература

1. **Агроклиматические ресурсы** Белгородской области. — Л., Гидрометеиздат, 1972, 91 с.
2. **Дубовик Д. В., Виноградов Д. Ю.** Погодные условия зимнего периода и урожайность озимой пшеницы. — Достижения науки и техники АПК, 2013, № 5, с. 23—24.
3. **Иванов Н. Н., Федоров В. А., Жуков А. В. и др.** Озимые в Центрально-Черноземной полосе. /Под ред. Н. Н. Иванова. — Воронеж, Центрально-Черноземное книжное изд-во, 1975, 104 с.
4. **Казакова Е. В., Чумаков М. М., Розинкина И. А.** Алгоритм расчета высоты свежеевпавшего снега, предназначенный для пост-процессинга систем атмосферного моделирования (на примере COSMO). — Труды Гидрометцентра России, 2013, № 350, с. 195—212.
5. **Китаев Л. М., Титкова Т. Б.** Изменчивость альбедо снежного покрова — анализ спутниковых данных. — Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011, т. 8, № 2, с. 47—54.
6. **Моисейчик В. А.** Агрометеорологические условия и перезимовка озимых культур. — Л., Гидрометеиздат, 1975, 295 с.
7. **Моисейчик В. А., Богомолова Н. А., Максименкова Т. А.** Оценка агрометеорологических условий осенне-зимнего периода для перезимовки и формирования валового урожая озимых зерновых культур в России. — Метеорология и гидрология, 2002, № 2, с. 89—102.



- 8. Повх В. И., Беков Б. Р., Шляхова Л. А., Воробейчик Е. А.** Тематическое картирование условий зимовки озимых культур по территории Ростовской области на основе спутниковой информации. — Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2013, т. 10, № 4, с. 257—261.
- 9. Повх В. И., Шляхова Л. А., Воробейчик Е. А.** Оценка условий зимовки зерновых культур по спутниковым данным для территории Ростовской области. — Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2010, т. 7, № 3, с. 267—268.
- 10. Погода** на территории Белгородской области; <http://гп5.ru>.
- 11. Терехин Э. А.** Оценка сезонных значений вегетационного индекса (NDVI) для детектирования и анализа состояния посевов сельскохозяйственных культур. — Исследование Земли из космоса, 2015, № 1, с. 23—31.
- 12. Шульгин А. М.** Агрометеорология и агроклиматология. — Л., Гидрометеиздат, 1978, 200 с.
- 13. Шульгин А. М.** Климат почвы и его регулирование. — Л., Гидрометеиздат, 1967, 300 с.
- 14. Bitner D., Carroll T., Cline D., and Romanov P.** An assessment of the differences between three satellite snow cover mapping techniques. — Hydrological Processes, 2002, vol. 16, pp. 3723—3733.
- 15. Dozier J.** Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat thematic mapper. — Remote Sens. Environ., 1989, No. 28, pp. 19—22.
- 16. Hall D. K. and Riggs G. A.** Accuracy assessment of the MODIS snow products. — Hydrol. Processes, 2007, vol. 21, pp. 1534—1547.
- 17. LPDAAC;** [https://lpdaac.usgs.gov/products/modis\\_products\\_table/mod09gq](https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mod09gq).
- 18. Malcher P., Floricioiu D., and Rott H.** Snow mapping in Alpine areas using medium resolution spectrometric sensors. /In: Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003, IGARSS 03, 2003, vol. 4, pp. 2835—2837.
- 19. Metsamaki S., Vepsalainen J., Pulliainen J., and Sucksdorff Y.** Improved linear interpolation method for the estimation of snow-covered area from optical data. — Remote Sens. Environ., 2002, vol. 82, pp. 64—78.
- 20. Negi H. S., Kulkarni A. V., and Semwab B. S.** Estimation of snow cover distribution in Beas basin, Indian Himalaya using satellite data and ground measurements. — J. Earth Syst. Sci., 2009, vol. 118, No. 5, pp. 525—538.
- 21. Notarnicola C., Duguay M., Moelg N., et al.** Snow cover maps from MODIS images at 250 m resolution. Part 1: Algorithm description. — Remote Sensing, 2013, vol. 5, No. 1, pp. 110—126.
- 22. Parajka J. and Blöschl G.** Validation of MODIS snow cover images over Austria. — Hydrol. Earth Syst. Sci., 2006, vol. 10, pp. 679—689.

Поступила  
13 XI 2015

**STUDYING THE WINTERING CONDITIONS OF WINTER CROPS  
FROM THE SATELLITE AND GROUND-BASED OBSERVATIONS  
(A CASE STUDY FOR THE BELGOROD OBLAST)**

E. A. Terekhin

*The method is proposed for assessing the wintering conditions of winter crops with the accuracy to the separate sown areas based on the joint use of the data of remote sensing and ground-based observations. The dependence is revealed between the snow depth and snow albedo in the red band (MOD09GQ satellite data). Geoinformation mapping of wintering conditions of winter crops cultivated in the Belgorod oblast is carried out for the winter period of 2012/2013.*