Возможности и опыт оперативного дистанционного мониторинга состояния озимых культур на территории России

П. В. Денисов [1, 2], И. И. Середа [1], К. А. Трошко [1, 3], Е. А. Лупян [1], Д. Е. Плотников [1], В. А. Толпин [1]

[1] *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: smis@d902.iki.rssi.ru
[2] *ООО «Институт космических исследований Земли», Москва, 121205, Россия*
E-mail: org@iki-z.ru
[3] *Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия*
E-mail: k.a.troshko@igras.ru

В работе рассматриваются данные, продукты и инструменты, реализованные в сервисах Вега-Science (http://sci-vega.ru/) и Вега-Pro (http://pro-vega.ru/), которые позволяют проводить оценку состояния сельскохозяйственных культур в различные периоды их развития. Опыт, накопленный в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН), фактически позволил создать методику постоянного оперативного мониторинга озимых культур, оценки их состояния и дальнейшего развития. В основе методики лежит детектирование площадей посевов, определение динамики вегетационного индекса NDVI на землях, занятых озимыми культурами, и анализ полученной информации совместно с метеорологическими показателями. Кроме того, анализ более чем 20-летнего ряда таких данных позволил для каждого района наблюдения провести расчёт среднемноголетних «норм» временной динамики NDVI. Отклонения временного хода NDVI от таких норм также используется как один из параметров оценки состояния озимых культур. На основе опыта, полученного авторами, сформулированы рекомендации по использованию тех или иных параметров и инструментов для проведения оценок состояния и развития озимых культур в разные годы и периоды. На различных примерах демонстрируются возможности использования инструментов анализа данных, реализованных в сервисах Вега-Science и Вега-Pro. В том числе демонстрируются потенциальные возможности проведения оценок урожайности озимых культур. В работе также представлен анализ качества обсуждаемых оценок, который показывает достаточно высокое их совпадение с реально наблюдаемой динамикой развития озимых культур.

Ключевые слова: Вега-Science, Вега-Pro, мониторинг посевов, озимые культуры, спутниковые системы наблюдения Земли, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 10.04.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-171-185

Введение

Мониторинг состояния сельскохозяйственных культур имеет большое значение для оперативных оценок состояния и объёмов сельскохозяйственной продукции, в которых заинтересованы как государственные органы, так и различные коммерческие организации. В России повышенное внимание при этом традиционно уделяется озимым культурам, посевы которых, в особенности в европейской части, занимают обширные площади. Следует отметить, что особое значение при этом играют методы и подходы, позволяющие получать однородные, сопоставимые оценки состояния озимых культур на больших территориях. Получение таких оперативных оценок сегодня, безусловно, невозможно без использования данных спутниковых наблюдений, поэтому в последние десятилетия разработке методов, ориентированных на решение этой задачи, уделяется большое внимание (см., например, работы (Береза и др., 2015; Клещенко, Савицкая, 2011; Лупян и др., 2011; Плотников и др., 2008, 2017; Толпин и др., 2014)).

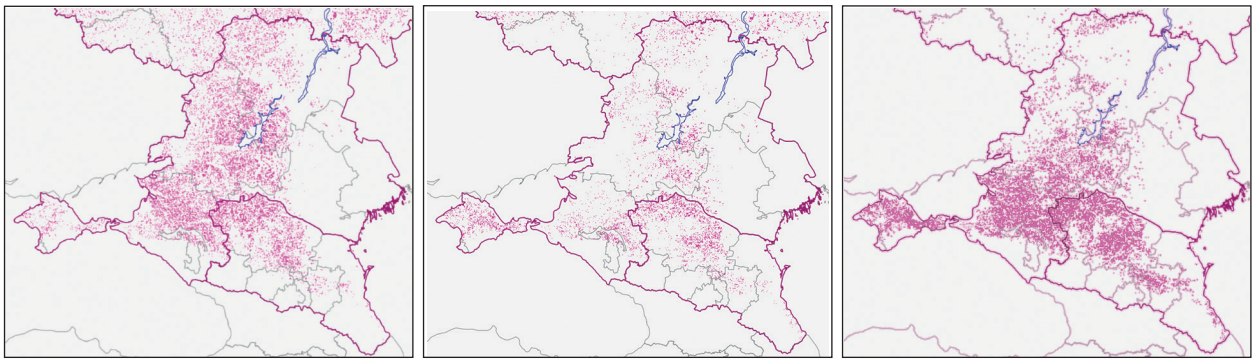
В настоящей работе анализируются возможности дистанционного мониторинга состояния озимых культур с целью раннего детектирования и оценки негативных и позитивных тенденций их развития. Анализ проводится на основе опыта решения этой задачи, накопленного Институтом космических исследований РАН (ИКИ РАН). Отметим, что подобные работы активно ведутся в ИКИ РАН в последнее десятилетие (Денисов и др., 2018, 2020; Лупян и др., 2017б, 2018, 2019б, 2020; Середа и др., 2020; Толпин и др., 2014). Анализ данных в этих работах осуществлялся на основе информационной системы Вега-Pro (http://pro-vega.ru) (Лупян и др., 2011, 2019а) с использованием многолетних архивов спутниковых данных Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (http://ckp.geosmis.ru/) (Лупян и др., 2019). Кроме того, с 2020 г. ИКИ РАН совместно с ООО «Институт космических исследований Земли» (ООО «ИКИЗ») выпускает регулярные бюллетени, в которых публикуются актуальные результаты мониторинга озимых культур на территории России (http://pro-vega.ru/bulletins.shtml).

Благодаря накопленному опыту в ИКИ РАН фактически сформировалась процедура проведения оперативной дистанционной оценки состояния озимых культур на территории России. Эта процедура основана на формировании «портретов» сезонной динамики индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) озимых культур в различных муниципальных образованиях, их сравнении со среднемноголетними показателями и данными конкретных годов, сопоставлении текущих и исторических погодных данных. При проведении анализа конкретных ситуаций также могут использоваться данные статистической отчётности. В настоящей работе представлены основные этапы обсуждаемой процедуры и приведены примеры её использования для проведения оценок состояния озимых культур в 2016–2021 гг.

Используемые материалы и методы анализа данных

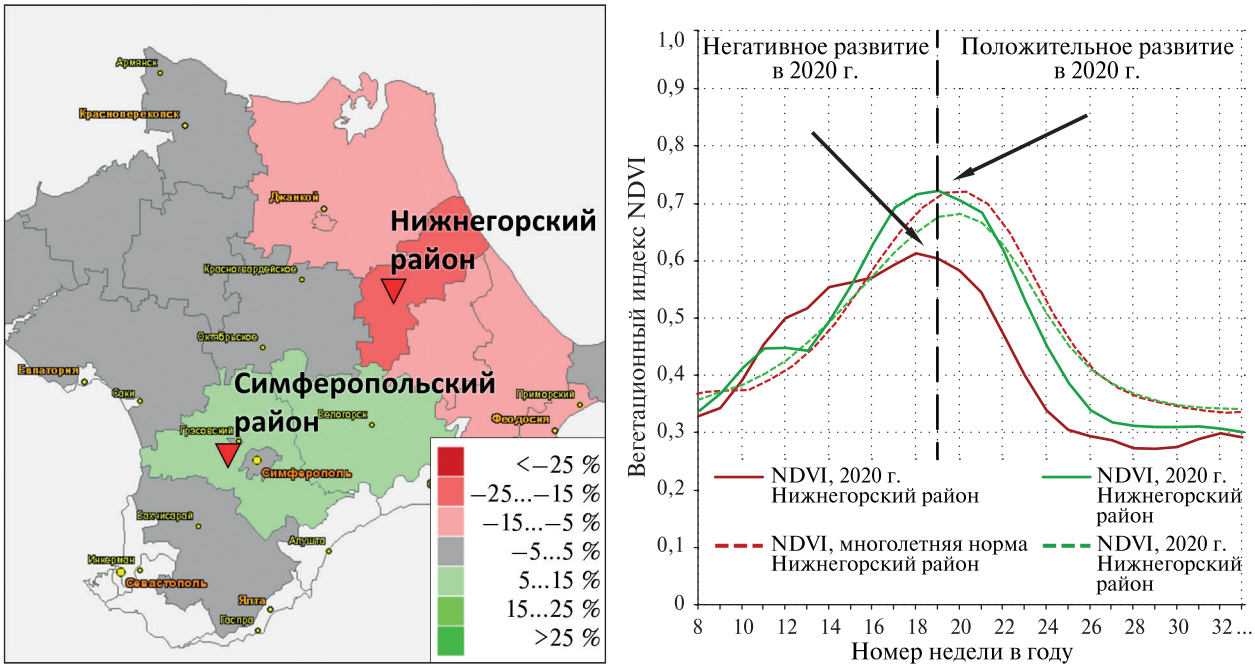
В процедуре мониторинга посевов сельскохозяйственных культур, разработанной в ИКИ РАН, используется различная информация, получаемая на основе спутниковых, метеорологических и статистических данных. В основе этой процедуры лежит анализ сезонной динамики вегетационного индекса NDVI и её связи с метеорологическими условиями на анализируемых территориях. Временные ряды NDVI формируются на конкретных территориях на основе еженедельных безоблачных композитов приборов MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), установленных на спутниках Terra и Aqua (Миклашевич и др., 2019; Нейштадт, 2006; Плотников и др., 2014). Следует отметить, что временные ряды формируются только с учётом значений NDVI, полученных для участков, на которых произрастают озимые культуры в анализируемом году. Поэтому первым шагом для проведения мониторинга озимых сельскохозяйственных культур становится детектирование участков их произрастания. Для этого используется метод, основанный на анализе временных рядов данных приборов MODIS. Подробно данный метод и его возможности описаны, в частности, в работах (Плотников и др., 2008, 2017). Метод позволяет формировать карты участков, на которых произрастают озимые культуры в конкретном году. В течение сезона эти карты периодически обновляются и уточняются. Примеры таких карт приведены на *рис. 1* (см. с. 173).

Полученные карты позволяют рассчитывать средний NDVI для участков, занятых озимыми культурами в конкретном районе в заданную неделю. Таким образом, может быть получен временной ряд NDVI для отдельного района. Анализ динамики развития озимых культур в отдельных районах обусловлен тем, что она может иметь существенные различия для муниципальных образований, расположенных даже относительно недалеко друг от друга. Пример таких различий приведён для Нижнегорского и Симферопольского районов Республики Крым на *рис. 2* (см. с. 173). На рисунке видно, что многолетние нормы развития NDVI озимых культур для этих районов несколько различаются, а также заметно существенное различие динамики NDVI в 2020 г.: в Симферопольском р-не наблюдаются значительные положительные отклонения, а в Нижнегорском — негативные.



а *б* *в*

Рис. 1. Озимые культуры, детектированные по спутниковым данным (обозначены розовым цветом): *а* — осенью 2018 г.; *б* — осенью 2015 г.; *в* — весной 2016 г.

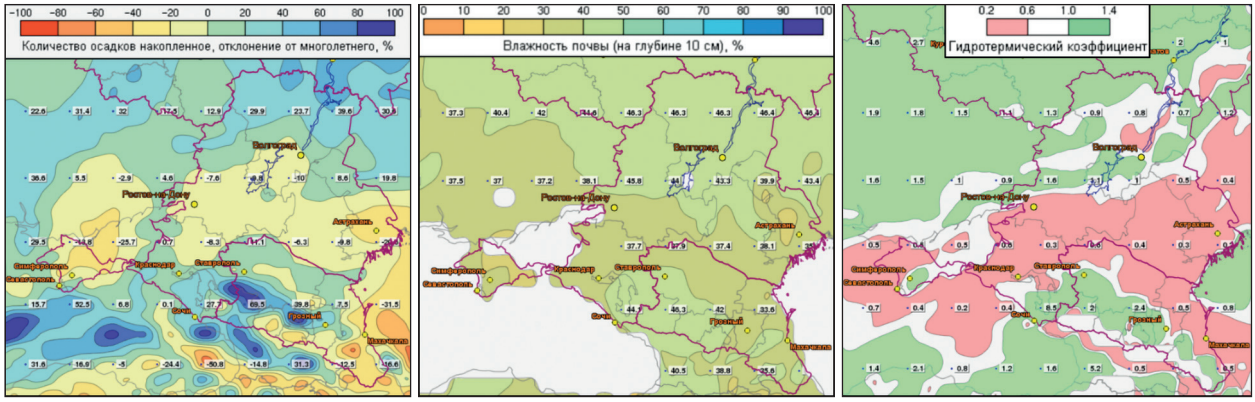


а *б*

Рис. 2. Республика Крым: *а* — отклонение NDVI озимых в процентах от среднемноголетней нормы по состоянию на 19-ю неделю 2020 г. (4–10 мая); *б* — графики сезонного хода NDVI озимых культур для Нижнегорского и Симферопольского районов в 2020 г. и согласно многолетним наблюдениям

Наличие таких различий приводит к тому, что для проведения оценки «хорошо» или «проблемно» развиваются озимые в конкретном районе необходимо знание не только временной динамики NDVI рассматриваемого года, но и «нормального» (среднемноголетнего) хода развития озимых культур, а также динамики развития озимых в «хорошие» и «плохие» годы. Поэтому в системе Вега-Pro разработана специальная процедура, позволяющая автоматически формировать «нормальный» ход динамики NDVI. Один из методов формирования такой «нормы» описан, в частности, в работе (Толпин, Комаров, 2020). Таким образом, сегодня в системе для всех районов произрастания озимых культур на территории России имеются модели динамики NDVI («нормы»), отклонения от которых и могут служить индикаторами состояния озимых культур на конкретных территориях. Как будет показано ниже, анализ таких отклонений и причин их возникновения целесообразно проводить с учётом особенностей развития метеорологической ситуации в исследуемом районе.

Для проведения такого анализа в системе Вега-Pro реализован ряд инструментов, обеспечивающих возможности работы с различной метеоинформацией (Уваров и др., 2013). Базовая метеоинформация в системе — данные реанализа, предоставляемого в открытый доступ в рамках проекта NCEP (*англ.* National Centers for Environmental Prediction — Национальный центр экологических прогнозов) Национального управления океанических и атмосферных исследований США (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration — NOAA) (https://www.cpc.ncep.noaa.gov/). В сервисах предусмотрена возможность как картографического отображения погодных условий (*рис. 3*), так и их размещение на графике (*рис. 4*). Представление метеоинформации на картах позволяет анализировать распределение того или иного метеорологического показателя в пространстве, в то время как графики дают возможность оценивать их временной ход совместно с динамикой вегетационного индекса NDVI.



а *б* *в*

Рис. 3. Карты метеорологических показателей для южной части европейской территории России на 01.04.2020: *а* — количество осадков накопленное, отклонение от многолетнего; *б* — влажность почвы в слое 10 см; *в* — гидротермический коэффициент за месяц

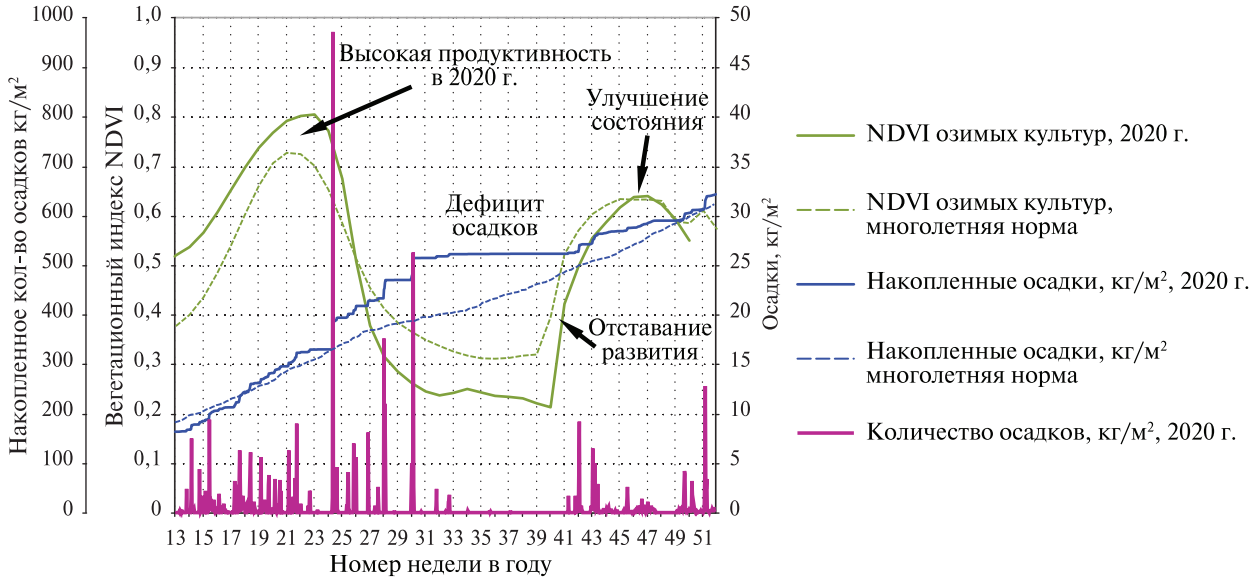
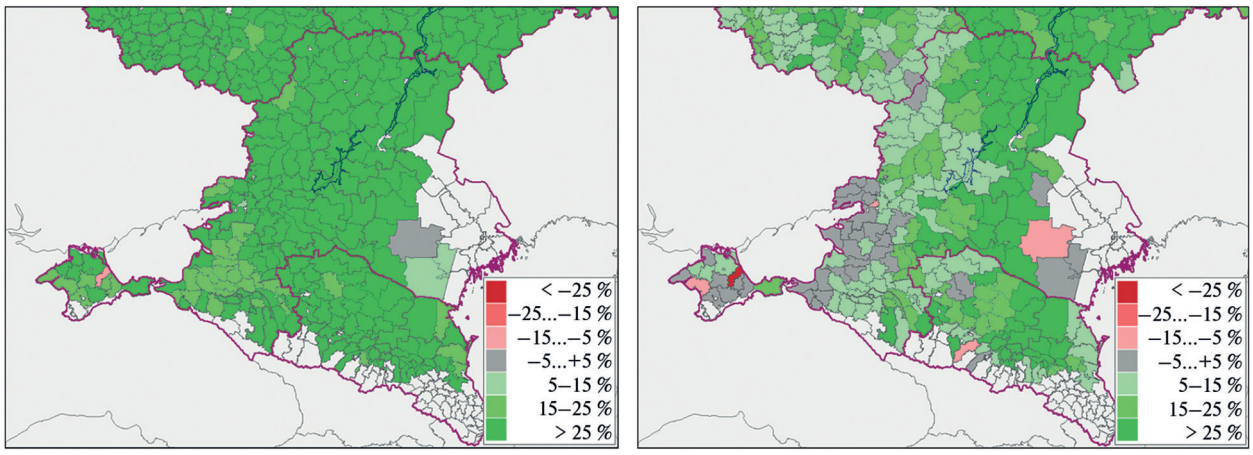


Рис. 4. Динамика NDVI и метеорологических показателей в 2020 г. Волгоградская обл., Михайловский р-н

На *рис. 4* показан пример визуализации динамики вегетационного индекса NDVI и метеорологических показателей в 2020 г. на примере Михайловского р-на Волгоградской обл. На его основе можно сделать ряд выводов. Например, в 2020 г. максимальные сезонные зна-

чения NDVI озимых культур заметно превышали среднемноголетний показатель, что говорит о высокой продуктивности посевов и указывает на высокую урожайность. В августе – сентябре наблюдался продолжительный период без выпадения осадков, что послужило причиной отставания в развитии посевов озимых культур осенью. Тем не менее возобновление дождей и, как следствие, накопление влаги в почве в октябре позволили посевам перед наступлением зимы развиться до состояния, близкого к среднемноголетнему.



а *б*

Рис. 5. Отклонение NDVI озимых в процентах от среднемноголетней нормы по состоянию на 15-ю неделю 2020 г. (6–12 апреля): *а* — до нормировки по накопленной температуре; *б* — после неё (Лупян и др., 2020)

В 2020 г. был разработан и внедрён в систему Вега-Pro инструмент, позволяющий нормировать временную динамику значений индекса NDVI и других используемых в системе показателей с учётом временного хода накопленных значений активной температуры в различные годы (Лупян и др., 2020). Это позволяет в первом приближении учитывать различия в особенностях метеорологической обстановки в разных сезонах при построении «норм» и сравнении информации, получаемой на основе спутниковых данных в различные сезоны. Такой учёт в ряде случаев, особенно на весеннем этапе развития озимых, может быть достаточно важен. Так, например, применение обсуждаемого инструмента позволило заблаговременно скорректировать оценку состояния озимых культур на юге европейской части России весной 2020 г. на менее благоприятную, несмотря на более раннее возобновление вегетации посевов по сравнению со среднемноголетней ситуацией (Лупян и др., 2020) (*рис. 5*).

Некоторые особенности дистанционной оценки состояния озимых культур в различные сезоны

В зависимости от времени года для проведения эффективного мониторинга озимых культур и корректности оценки их состояния рекомендуется обращать внимание на определённые показатели и использовать различные метеорологические характеристики. В этой части работы приводится состав данных, а также способы и инструменты их анализа, которые показали свою эффективность при проведении оценки состояния озимых в различные годы. Наиболее универсальными инструментами решения обсуждаемой задачи оказываются картограммы отклонений текущих значений вегетационного индекса NDVI от среднемноголетних, графики сезонной динамики NDVI и метеорологических параметров, карты накопленных осадков, гидротермического коэффициента и влагосодержания в почве. Однако в зависимости от периода проведения мониторинга особенности применения обозначенных инструментов различаются.

Периоды мониторинга озимых культур можно разделить на части по временам года: осенний, зимний, весенний и летний.

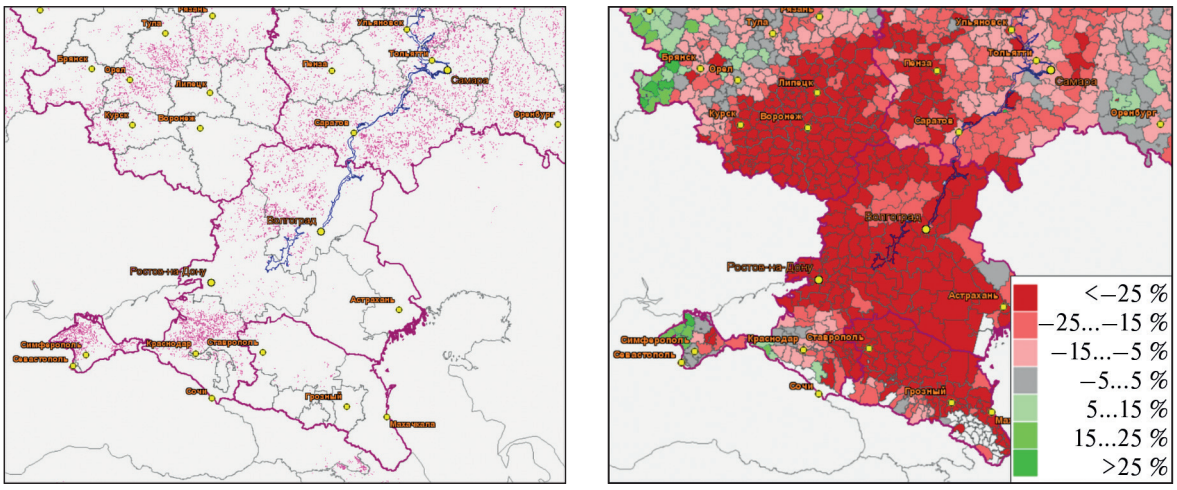
Осенний период

В осенний период для озимых ключевое значение имеет качество и количество всходов, развитие культур перед наступлением зимы. Весьма важным становится достаточное развитие озимых культур, чтобы они могли перенести холодное время года, но при этом не погибли, преждевременно достигнув поздних фенологических стадий развития. Также при осуществлении мониторинга озимых культур в осенний период следует обратить особое внимание на угрозу засухи и на длительность периода с активной температурой.

Сочетание картограмм отклонений значений NDVI от многолетней нормы, карт гидротермического коэффициента и графиков позволяет оценить масштабы положительных или отрицательных отклонений в развитии озимых культур и объяснить их причину, определить продолжительность периода развития посевов. Более высокие значения осеннего максимума NDVI указывают на больший объём накопленной надземной фитомассы. Периоды с отсутствием осадков или остановкой роста накопленных осадков, а также низкие значения гидротермического коэффициента говорят об угрозе возникновения засухи.

Отдельного внимания заслуживает оценка карты озимых культур с признаками активной вегетации, выявленных на основе данных спутникового мониторинга. С учётом того, что площади сева озимых культур год от года значительно не меняются, снижение их площади, детектируемой по космическим снимкам, становится значимым признаком их негативного развития. Так, если сравнить указанные продукты, полученные осенью 2015 и 2018 гг., можно заметить, что в 2015 г. развитие озимых культур в это время года было гораздо менее благоприятным (см. *рис. 1а*, *б*).

Осенью 2020 г. наблюдалась масштабная засуха на территории юга европейской части России. Озимые культуры определялись методами дистанционного зондирования на значительно меньших площадях, чем обычно (*рис. 6а*), а картограмма отклонений вегетационного индекса NDVI от среднемноголетних значений для сельскохозяйственных земель показывала тревожную ситуацию на большей территории Южного (ЮФО), Северо-Кавказского (СКФО) и Центрального (ЦФО) федеральных округов (*рис. 6б*). Благодаря данному подходу удалось определить регионы и муниципальные образования, в которых риск неблагоприятного развития озимых культур наиболее высок.



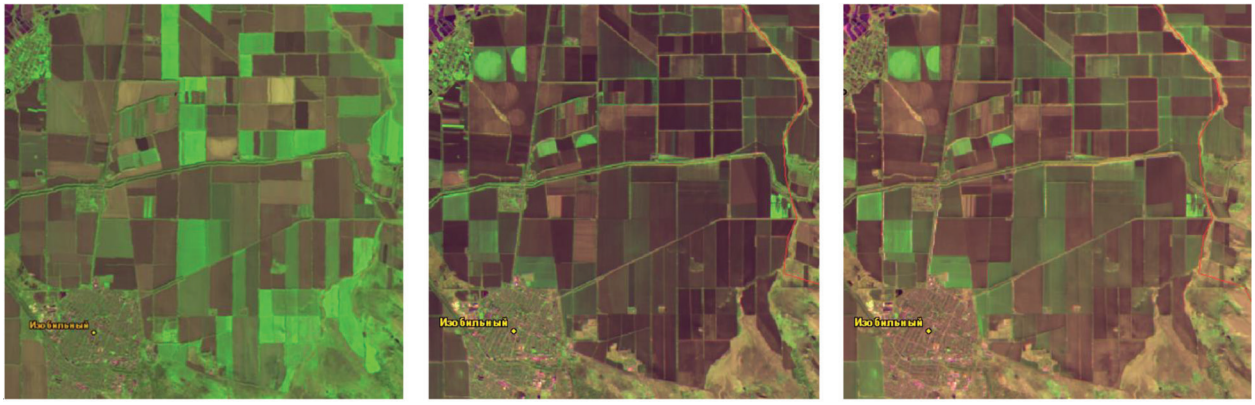
а *б*

Рис. 6. Озимые культуры, детектированные по спутниковым данным (17.12.2020) (*а*). Отклонения вегетационного индекса NDVI от среднемноголетних значений для сельскохозяйственных земель на 45-ю неделю (2–8 ноября) 2020 г. (*б*)

Зимний период

В зимний период года использование картограмм отклонений вегетационного индекса NDVI нецелесообразно, так как большая часть России постоянно или периодически находится под снежным покровом. Большее значение приобретает анализ метеорологических показателей, таких как накопленные осадки, глубина снежного покрова, а также температура воздуха.

Таким образом, особое внимание следует уделить наличию снежного покрова на территориях с продолжительным периодом отрицательной температуры (угроза вымерзания посевов), наличию многократных оттепелей и заморозков, которые могут указывать на формирование ледяной корки (угроза выпревания посевов), и другие негативные погодные явления. Большое значение зимой имеет мониторинг накопленных осадков, так как выпавший в этот период снег играет важную роль в формировании запаса влаги, необходимого для развития посевов весной.



а *б* *в*

Рис. 7. Развитие посевов озимых культур в Изобильненском р-не Ставропольского края: *а* — изображение от 12.11.2019 (Landsat-8); *б* — от 28.11.2020 (Sentinel-2); *в* — от 01.02.2021 (Sentinel-2)

Также полезно использовать космические снимки различного пространственного разрешения, визуальный анализ которых позволяет подтвердить сделанные выводы, а также получить дополнительную информацию. Так, например, в январе 2021 г. на территории Ставропольского края были обнаружены всходы озимых культур, которые вследствие засушливой осени не получили достаточного развития и не детектировались в ноябре–декабре 2020 г. (*рис. 7*).

Весенний период

Весенний период развития озимых культур является ключевым. Для правильной оценки состояния озимых весной может быть использовано значительное количество возможностей сервиса «Вега».

Одним из важных вопросов мониторинга озимых культур ранней весной является оценка их состояния после зимы. Важно понять, какая доля посевов погибла в холодное время года. Для этого по данным дистанционного зондирования создаётся новая весенняя карта озимых, которая сопоставляется с последней осенней картой. Разница в детектируемой площади говорит о том, насколько хорошо посевы пережили зиму, в каких регионах ситуация развивается более благополучно, а в каких — менее. Так, в сезоне 2015–2016 гг. небольшая площадь детектируемых осенью озимых культур значительно увеличилась к весне, что стало результатом благоприятных погодных условий зимой (см. *рис. 1б*, *в*).

Считается, что весеннее возобновление вегетации посевов начинается с момента устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через отметку +10 °С. В этот момент

чрезвычайно важно отслеживать динамику развития вегетационного индекса NDVI, так как его значения в данный период сильно влияют на объём наземной фитомассы и потенциальную урожайность. В целом более высокие значения NDVI весной указывают на благоприятное развитие озимых культур.

Рекомендуется также обратить внимание на погодные условия, сопровождающие развитие посевов, так как нехватка почвенной влаги, отсутствие осадков, переувлажнение и заморозки могут стать причиной негативных отклонений в развитии культур. С учётом того, что в настоящих оценках используется анализ средних значений NDVI по всем угодьям, на которых возделываются культуры в конкретном муниципальном районе, можно считать, что они мало зависят от условий обработки озимых на конкретных полях, а наблюдаемые отклонения вегетационного индекса NDVI в основном оказываются следствием тех или иных погодных явлений. Стоит также отметить, что для уменьшения влияния на результаты анализа особенностей сезонов различных лет (в первую очередь сдвигов времени начала вегетационного сезона) при анализе следует использовать данные, нормированные на временной ход накопленных температур.

Летний период

Как правило, в мае – июне для большинства регионов России значения вегетационного индекса NDVI достигают максимума. Максимальное значение NDVI очень информативно для итоговой оценки состояния озимых культур и прогнозирования их урожайности. Дальнейшее падение индекса также представляет интерес, однако оказывается намного менее информативным признаком для оценки состояния озимых. Таким образом, в отличие от осеннего и весеннего периодов летом наибольший интерес представляют не картограммы отклонений значений NDVI от многолетней нормы, а картограммы разницы максимальных значений NDVI выбранного сезона и среднемноголетних максимумов (*рис. 8*).

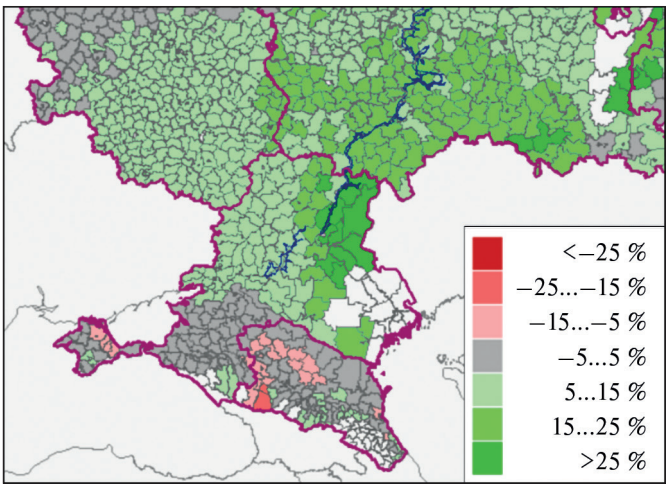


Рис. 8. Порайонная разница максимальных значений вегетационного индекса NDVI 2020 г. и среднемноголетних максимумов для озимых культур

Бывают ситуации, когда летняя засуха наступает на поздних стадиях развития озимых культур. В этом случае им, как правило, мало что угрожает, в отличие от яровых культур. На *рис. 9* показана ситуация с развитием озимых и яровых культур в Ставропольском крае в 2015 г. Можно заметить, что острый дефицит осадков возник уже после достижения озимыми культурами максимальных сезонных значений NDVI. Благодаря этому их состояние оценивалось как соответствующее многолетней норме. В то же время условия для развития яровых культур были значительно менее благоприятными.

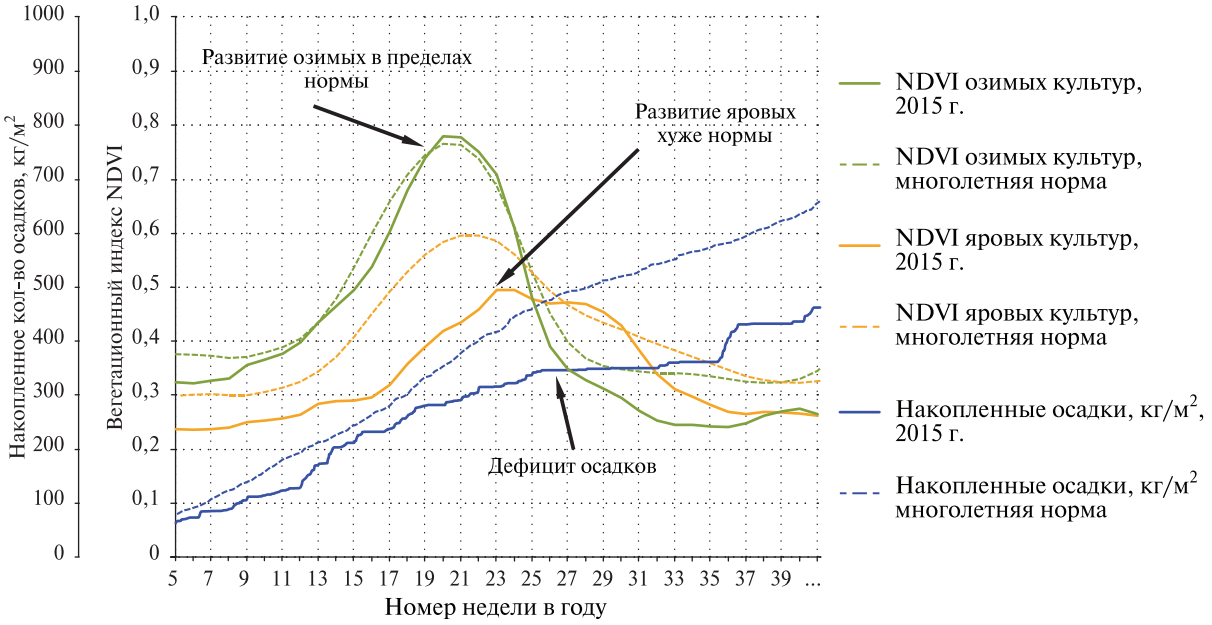


Рис. 9. Динамика NDVI озимых и яровых культур, метеорологических показателей в 2015 г. Ставропольский край

Таблица 1. Данные, которые рекомендуется использовать для оценки состояния озимых культур в различные периоды проведения мониторинга

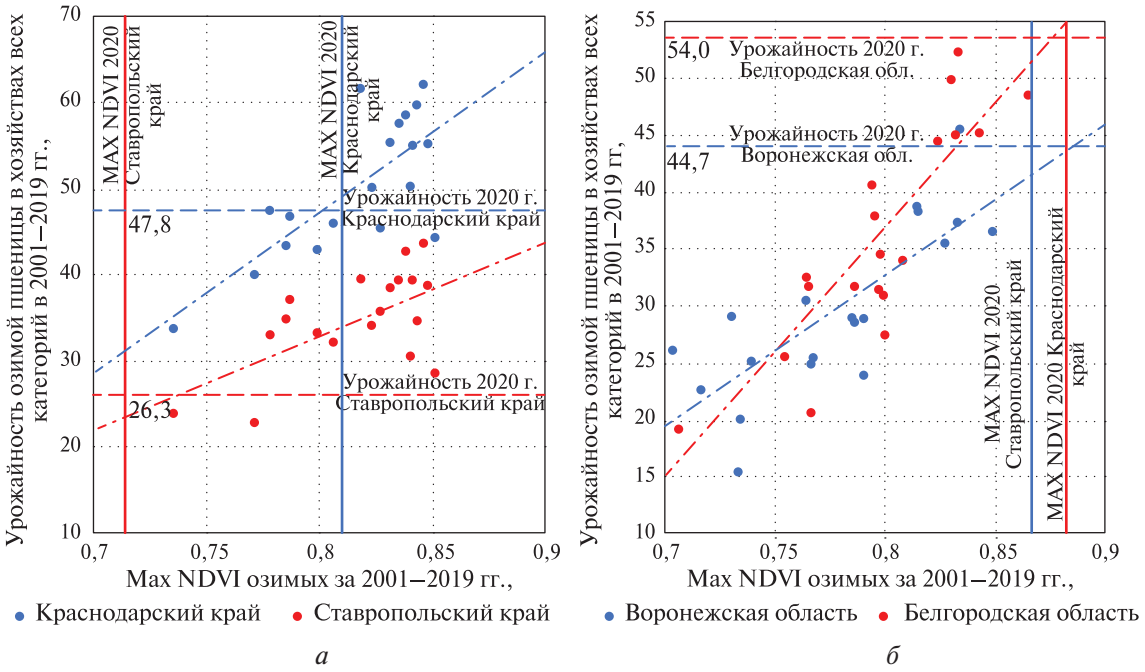
Данные	Период мониторинга			
	Осень	Зима	Весна	Лето
Космические снимки и индексные изображения	+	+	+	+
Температура и осадки	+	+	+	+
Гидротермический коэффициент и влага в почве	+	–	+	+
Глубина снежного покрова	–	+	–	–
Сезонная динамика NDVI	+	–	+	+
Карты озимых культур, выявленных по данным дистанционного зондирования	+	–	+	±
Карта отклонений NDVI от многолетней нормы	+	–	+	±
Карта отклонений максимумов NDVI от многолетних максимумов	–	–	–	+

Таким образом, мы видим, что в зависимости от периода наблюдений те или иные показатели могут оказаться более информативными для корректной оценки состояния посевов. Ряд основных информационных продуктов, которые рекомендуется использовать для проведения мониторинга озимых культур, приведён в *табл. 1.* Данные, на которые весьма желательно опираться, отмечены знаком «+». Данные, которые в конкретном периоде мониторинга неважны, — знаком «–». Данные, использование которых необязательно, но в отдельных случаях может оказаться полезным, — знаком «±».

Потенциальные возможности оценки урожайности озимых культур

Вопросу оценки урожайности культур по спутниковым данным посвящено значительное число работ (Береза и др., 2015; Клещенко, Савицкая, 2011; Куссуль и др., 2012). Отметим, что анализ временных рядов динамики NDVI на землях, занятых озимыми культурами, показывает высокую корреляцию максимальных значений NDVI озимых с их урожайностью,

что потенциально обеспечивает возможность прогнозирования этого показателя. Например, в 2020 г. специалистами ИКИ РАН была выполнена оценка урожайности озимой пшеницы на основе многолетних данных о весенне-летних максимумах NDVI озимых культур и статистических данных об урожайности в регионах, в которых доля пшеницы в структуре озимого сева составляет более 90 %. В качестве модели прогнозирования была использована простая линейная регрессия. Преимущество приведённого метода заключается в возможности с достаточно хорошей точностью провести оценку урожайности за 1–1,5 мес до уборки культуры (*рис. 10*). В то же время методы проведения таких оценок, безусловно, требуют дальнейшего развития и верификации.



а *б*

Рис. 10. Связь максимальных сезонных значений NDVI озимых культур и урожайности озимой пшеницы в хозяйствах всех категорий (https://fedstat.ru/) для регионов с менее благоприятным (*а*) и более благоприятным (*б*) развитием посевов. Погрешность прогнозирования не превышает 2 ц/га (Денисов и др., 2020)

Заключение

Отметим, что, на основе описанных в настоящей работе подходов и возможностей системы Вега-Pro специалистами ИКИ РАН и ООО «ИКИЗ» в течение последних пяти лет достаточно регулярно проводилась оценка состояния озимых культур. Так, весной 2017 г. была отмечена хорошая всхожесть сельскохозяйственных культур, низкие риски их неблагоприятного развития, а также предполагалась рекордно высокая урожайность: не ниже, а во многих регионах и выше показателей 2016 г. (Барталев и др., 2017; Лупян и др., 2017а). В 2018 и 2019 гг. отмечалось относительно благоприятное развитие озимых культур (Лупян и др., 2018, 2019). В 2020–2021 гг. также было проведено достаточно много оценок состояния озимых, результаты которых приведены, например, в работах (Денисов и др., 2020; Лупян и др., 2020, 2021; Середа и др., 2020). Подавляющая часть оценок в большой степени подтвердилась. Это хорошо видно из информации, приведённой в *табл. 2*, в которой сведены результаты, опубликованные в 2020–2021 гг. в информационных бюллетенях о состоянии озимых культур по данным дистанционного мониторинга, размещённых в системе Вега-Pro.

Таким образом, можно сделать вывод, что находящаяся в системе Вега-Pro информация, инструменты и процедуры её анализа позволяют достаточно эффективно проводить непрерывный оперативный спутниковый мониторинг озимых культур в течение всего периода их

развития. Потенциально имеющаяся в системе информация и инструменты могут позволить реализовать новые процедуры оперативной оценки состояния озимых культур.

Таблица 2. Результаты оценок состояния озимых культур по данным спутниковых наблюдений, опубликованные в бюллетенях ИКИ РАН (http://pro-vega.ru/bulletins.shtml)

Дата выпуска, веб-ссылка	Основные выводы	Оправдываемость выводов	Ссылки на источники*
07.04.2020, http://pro-vega.ru/press/2020_04_07_wincrops.pdf	• Сдвиг вегетации на более ранний срок; • риски дефицита влаги в южных регионах; • в Республике Крым повышены риски плохого развития озимых в связи с заморозками	Полностью подтвердились	1, 3, 4
06.05.2020, http://pro-vega.ru/press/2020_05_06_wincrops.pdf	• Ухудшение состояния озимых культур вследствие засухи; • ожидание более низкой урожайности для Ростовской обл. и Ставропольского края	Частично подтвердились	1
15.06.2020, http://pro-vega.ru/press/2020_06_15_crops.pdf	• Осадки улучшили ситуацию с развитием озимых в большинстве регионов; • в Краснодарском и Ставропольском краях осадки оказались недостаточно своевременными	Полностью подтвердились	1, 5
24.07.2020, http://pro-vega.ru/press/2020_07_24_crops.pdf	• Урожайность для Центрального ФО и запада Приволжского ФО ожидается крайне высокой; • урожайность в Ставропольском крае, Республике Крым, Республике Калмыкия ожидается на более низком уровне	Полностью подтвердились	1, 2
31.08.2020, http://pro-vega.ru/press/2020_08_31_crops.pdf	• Определены области с положительными и отрицательными отклонениями в урожайности; • проведён количественный прогноз урожайности озимой пшеницы для регионов с преобладанием этой культуры в севообороте	Частично подтвердились	1, 2
06.10.2020, http://pro-vega.ru/press/2020_10_06_bulletin.pdf	• Масштабная засуха в европейской части России; • определены регионы с наименьшей площадью всходов	Полностью подтвердились	1, 8
14.12.2020, http://pro-vega.ru/press/2020_12_14_wincrops.pdf	• Стрессовое состояние посевов вследствие засухи в ЮФО, СКФО и на юге ЦФО; • осенние осадки оказали благоприятное воздействие, но риски неблагополучного развития остались высокими	Полностью подтвердились	1, 9
08.02.2021, http://pro-vega.ru/press/2021_02_08_wincrops.pdf	• Условия зимы оказались благоприятными для озимых культур; • появление всходов культур, не обнаруженных осенью	Полностью подтвердились	1, 2, 6, 7

* 1. Обзор текущих агрометеорологических условий на территории России (https://meteoinfo.ru/agro-review).

2. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС) (https://fedstat.ru/).

3. Состояние озимых в России лучшее за последние 20 лет (24.03.2020) (https://www.agroinvestor.ru/).

4. Заморозки в Крыму повредили до 80 % озимого ячменя (23.03.2020) (https://crimea.ria.ru).

5. JRC MARS Bulletin global outlook 2020. Crop monitoring European neighbourhood. Russia (https://ec.europa.eu/).

6. На полях Ставрополья взошли 50 % посевов озимых культур (29.01.2021) (http://mcxac.ru/o-tsentre/novosti).

7. Засуха в Крыму не помешала взойти посевам озимых культур (13.01.2021) (https://crimea-news.com/).

8. Самое интересное за неделю с 5 по 11 октября (11.10.2020) (https://www.agroinvestor.ru/).

9. В России отмечено плохое состояние озимых (https://agrarii.com/).

Следует отметить, что, на наш взгляд, важным направлением внедрения инструментов анализа данных, реализованных в системе Вега-Pro, и описанных в работе процедур в практику является создание специализированных программ обучения представленным возможностям для специалистов агропромышленного сектора. Описываемые работы ИКИ РАН в настоящее время ведёт в рамках Научно-образовательного центра «Инновационные решения в АПК» (https://www.nocapk.ru/).

Работа выполнена в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164).

Литература

1. *Барталев С. А.*, *Елкина Е. С.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Толпин В. А.* Дистанционная оценка озимых культур урожая 2017 года в Российской Федерации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 275–280.
2. *Береза О. В.*, *Страшная А. И.*, *Лупян Е. А.* О возможности прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Среднем Поволжье на основе комплексирования наземных и спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 18–30.
3. *Денисов П. В.*, *Крашенинникова Ю. С.*, *Лупян Е. А.*, *Мартьянов А. С.*, *Плотников Д. Е.*, *Середа И. И.*, *Толпин В. А.*, *Трошко К. А.* Наблюдение развития озимых культур в России осенью 2018 года на основе данных дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 272–280.
4. *Денисов П. В.*, *Середа И. И.*, *Трошко К. А.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Толпин В. А.* Особенности развития озимых и яровых культур на европейской территории России в сезоне 2019–2020 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 306–311.
5. *Клещенко А. Д.*, *Савицкая О. В.* Технология ежедекадной оценки урожайности зерновых культур по спутниковой и наземной агрометеорологической информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 178–182.
6. *Куссуль Н. Н.*, *Кравченко А. Н.*, *Скакун С. В.*, *Адаменко Т. И.*, *Шелестов А. Ю.*, *Колотий А. В.*, *Грипич Ю. А.* Регрессионные модели оценки урожайности сельскохозяйственных культур по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 95–107.
7. *Лупян Е. А.*, *Савин И. Ю.*, *Барталев С. А.*, *Толпин В. А.*, *Балашов И. В.*, *Плотников Д. Е.* Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («ВЕГА») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 190–198.
8. *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Крашенинникова Ю. С.*, *Плотников Д. Е.*, *Толпин В. А.* (2017а) Аномальное развитие яровых культур в регионах европейской части России в 2017 году // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 324–329.
9. *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Крашенинникова Ю. С.*, *Плотников Д. Е.*, *Толпин В. А.* (2017б) Наблюдение раннего развития озимых культур в южных регионах европейской части России весной 2017 года на основе данных дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 268–272.
10. *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Крашенинникова Ю. С.*, *Плотников Д. Е.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* Анализ развития озимых культур в южных регионах европейской части России весной 2018 года на основе данных дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 272–276.
11. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Кашницкий А. В.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Константинова А. М.*, *Кобец Д. А.*, *Мазуров А. А.*, *Марченков В. В.*, *Матвеев А. М.*, *Радченко М. В.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* (2019а) Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170.
12. *Лупян Е. А.*, *Буланов К. А.*, *Денисов П. В.*, *Крашенинникова Ю. С.*, *Плотников Д. Е.*, *Толпин В. А.*, *Трошко К. А.*, *Уваров И. А.* (2019б) Анализ развития озимых культур в южных регионах европейской части России в феврале 2019 года на основе данных дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 266–271.
13. *Лупян Е. А.*, *Денисов П. В.*, *Середа И. И.*, *Трошко К. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Толпин В. А.* Наблюдение развития озимых культур в южных регионах России весной 2020 г. на основе данных дистанционного

мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 2. С. 285–291.
14. *Лупян Е. А.*, *Середа И. И.*, *Денисов П. В.*, *Трошко К. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Толпин В. А.* Дистанционный мониторинг состояния озимых культур зимой 2020–2021 гг. на Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 165–172.
15. *Миклашевич Т. С.*, *Барталев С. А.*, *Плотников Д. Е.* Интерполяционный алгоритм восстановления длинных временных рядов данных спутниковых наблюдений растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 143–154.
16. *Нейштадт И. А.* Построение безоблачных композитных спутниковых изображений MODIS для мониторинга растительности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. № 2. С. 359–365.
17. *Плотников Д. Е.*, *Барталев С. А.*, *Лупян Е. А.* Метод детектирования летне-осенних всходов озимых культур по данным радиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 322–330.
18. *Плотников Д. Е.*, *Миклашевич Т. С.*, *Барталев С. А.* Восстановление временных рядов данных дистанционных измерений методом полиномиальной аппроксимации в скользящем окне переменного размера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 103–110.
19. *Плотников Д. Е.*, *Барталев С. А.*, *Лупян Е. А.*, *Толпин В. А.* Оценка точности выявления посевов озимых культур в весенне-летний период вегетации по данным прибора MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 132–145.
20. *Середа И. И.*, *Денисов П. В.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Толпин В. А.*, *Трошко К. А.* Уникальные условия развития озимых культур, наблюдаемые по данным спутникового мониторинга на европейской территории России в октябре 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 304–310.
21. *Толпин В. А.*, *Комаров В. Б.* Анализ эффективности нормировки на температуру при построении «норм» среднемноголетней временной динамики вегетационных индексов // Материалы 18-й Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2020. С. 371.
22. *Толпин В. А.*, *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Матвеев А. М.* Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «ВЕГА» // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7(306). С. 581–586.
23. *Уваров И. А.*, *Халикова О. А.*, *Балашов И. В.*, *Бурцев М. А.*, *Лупян Е. А.*, *Матвеев А. А.*, *Платонов А. Е.*, *Прошин А. А.*, *Толпин В. А.*, *Крашенинникова Ю. С.* Организация работы с метеорологической информацией // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 30–45.

Opportunities and experience of operational remote monitoring of winter crops condition in Russia

P. V. Denisov [1, 2], I. I. Sereda [1], K. A. Troshko [1, 3], E. A. Loupian [1], D. E. Plotnikov [1], V. A. Tolpin [1]

[1] *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: org@iki-z.ru
[2] *OOO Space Research Institute for the Earth, Moscow 121205, Russia*
E-mail: org@iki-z.ru
[3] *Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia*
E-mail: k.a.troshko@igras.ru

This paper considers the data, products, and tools implemented in Vega-Science (http://sci-vega.ru/) and Vega-Pro (http://pro-vega.ru/) services, which make it possible to assess agricultural crops condition in different periods of their development. The experience gained at the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAS) allowed creating a methodology for continuous operational

monitoring of winter crops, assessing their condition and further development. This methodology is based on the crop area detection, the determination of vegetation index NDVI dynamics on the lands occupied by winter crops, and the analysis of this information along with meteorological indicators. In addition, the analysis of more than 20 years of such data allowed us to calculate the average long-term patterns of the NDVI time dynamics for each observation area. Deviations of the NDVI patterns are also used as one of the parameters for assessing winter crops condition. On the basis of the authors' experience, the recommendations are formulated for the use of various parameters and tools for assessing conditions and development of winter crops in different years and periods. The possibilities of using data analysis tools implemented in the Vega-Science and Vega-Pro services are demonstrated by various examples. Among other things, the potential of assessing the winter crops yield is demonstrated. The paper also presents an analysis of the quality of the estimates discussed, which shows extremely high coincidence with the actual observed dynamics of winter crops development.

Keywords: Vega-Science, Vega-Pro, crops monitoring, winter crops, Earth observation satellite systems, remote sensing

Accepted: 10.04.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-171-185

References

1. Bartalev S. A., Elkina E. S., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Tolpin V. A., Remote sensing of 2017 winter crops in the Russian Federation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 275–280 (in Russian).
2. Bereza O. V., Strashnaya A. I., Loupian E. A., On the possibility to predict the yield of winter wheat in the Middle Volga region on the basis of integration of land and satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 18–30 (in Russian).
3. Denisov P. V., Krasheninnikova Yu. S., Loupian E. A., Martyanov A. S., Plotnikov D. E., Sereda I. I., Tolpin V. A., Troshko K. A., Observation of winter crops development in Russia in autumn 2018 based on remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 272–280 (in Russian).
4. Denisov P. V., Sereda I. I., Troshko K. A., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Tolpin V. A., Development of winter and spring crops in European Russia in the season 2019–2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 306–311 (in Russian).
5. Kleshchenko A. D., Savitskaya O. V., Technology of decade estimation of grain crops yield on satellite and ground-based agrometeorological information, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 178–182 (in Russian).
6. Kussul N. N., Kravchenko A. N., Skakun S. V., Adamenko T. I., Shelestov A. Yu., Kolotii A. V., Gripich Yu. A., Crop Yield Forecasting Regression Models based on MODIS data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 95–107 (in Russian).
7. Loupian E. A., Savin I. Yu., Bartalev S. A., Tolpin V. A., Balashov I. V., Plotnikov D. E., Satellite Service for Vegetation Monitoring VEGA, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 190–198 (in Russian).
8. Loupian E. A., Bartalev S. A., Krasheninnikova Yu. S., Plotnikov D. E., Tolpin V. A. (2017a), Abnormal development of spring crops in European Russia in 2017, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 324–329 (in Russian).
9. Loupian E. A., Bartalev S. A., Krasheninnikova Yu. S., Plotnikov D. E., Tolpin V. A. (2017b), Observation of early development of winter crops in spring 2017 in southern regions of Russia based on remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 268–272 (in Russian).
10. Loupian E. A., Bartalev S. A., Krasheninnikova Yu. S., Plotnikov D. E., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Analysis of winter crops development in the southern regions of the European part of Russia in spring of 2018 with use of remote monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 2, pp. 272–276 (in Russian).
11. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A. (2019a), Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian).

12. Loupian E. A., Bulanov K. A., Denisov P. V., Krasheninnikova Yu. S., Plotnikov D. E., Tolpin V. A., Troshko K. A., Uvarov I. A. (2019b), Analysis of winter crops development in the southern regions of the European part of Russia in February 2019 based on remote monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 266–271 (in Russian).
13. Loupian E. A., Denisov P. V., Sereda I. I., Troshko K. A., Plotnikov D. E., Tolpin V. A., Analysis of winter crops development in the southern regions of Russia in spring 2020 based on remote monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 2, pp. 285–291 (in Russian).
14. Loupian E. A., Sereda I. I., Denisov P. V., Troshko K. A., Plotnikov D. E., Tolpin V. A., Remote monitoring of winter crops condition in the winter of 2020/2021 in the European territory of Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 1, pp. 165–172 (in Russian).
15. Miklashevich T. S., Bartalev S. A., Plotnikov D. E., Interpolation algorithm for the recovery of long satellite data time series of vegetation cover observation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 143–154 (in Russian).
16. Neishtadt I. A., Construction of cloudless composite MODIS satellite images for vegetation monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 3, No. 2, pp. 359–365 (in Russian).
17. Plotnikov D. E., Bartalev S. A., Loupian E. A., Method of detection of summer-autumn seedlings of winter crops according to the MODIS radiometer, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 5, No. 2, pp. 322–330 (in Russian).
18. Plotnikov D. E., Miklashevich T. S., Bartalev S. A., Using local polynomial approximation within moving window for remote sensing data time-series smoothing and data gaps recovery, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 103–110 (in Russian).
19. Plotnikov D. E., Bartalev S. A., Loupian E. A., Tolpin V. A., Accuracy assessment for winter crops mapping in spring-summer growing season with MODIS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 132–145 (in Russian).
20. Sereda I. I., Denisov P. V., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Tolpin V. A., Troshko K. A., The unique situation of winter crops development observed from remote sensing data in the European territory of Russia in October 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 304–310 (in Russian).
21. Toplin V. A., Komarov V. B., Analysis of the efficiency of temperature normalization in the construction of "norms" of the monthly-annual average time dynamics of vegetation indices, *Materialy Vosemnadtsatoi Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 18th All-Russia Open Conf."Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAN, 2020, p. 371 (in Russian).
22. Tolpin V. A., Loupian E. A., Bartalev S. A., Plotnikov D. E., Matveev A. M., The possibilities of analyzing the state of agricultural vegetation using the satellite service "VEGA", *Optika atmosfery i okeana*, 2014, Vol. 27, No. 7(306), pp. 581–586 (in Russian).
23. Uvarov I. A., Khalikova O. A., Balashov I. V., Burtsev M. A., Loupian E. A., Matveev A. A., Platonov A. E., Proshin A. A., Tolpin V. A., Krasheninnikova Yu. S., Meteorological data management in framework of the satellite monitoring information systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 30–45 (in Russian).