Спутниковая оценка ретроспективной даты сева яровых культур на основе нейросетевой модели и рядов данных высокого временного разрешения прибора КМСС

Д. Е. Плотников [1], П. А. Колбудаев [1], Е. С. Ёлкина [1], Е. А. Дунаева [2]

[1] *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: dmitplot@d902.iki.rssi.ru

[2] *Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, Симферополь, 295043, Россия*

Представлена оценка информативности рядов мультиспектральных спутниковых данных прибора КМСС (Комплекс многозональной спутниковой съёмки) ежедневного временного разрешения и агроклиматических индикаторов данных реанализа NCEP (*англ.* National Centers for Environmental Prediction) для дистанционного определения ретроспективной даты сева яровых культур с помощью нейросетевой модели Bi-LSTM (*англ.* Bi-Directional Long Short-Term Memory). Исследование включает в себя серию экспериментов для сравнения эффективности мультисезонных и мультимодальных нейросетевых моделей, использующих многолетние спутниковые, агроклиматические и полевые данные за сезоны вегетации 2018–2022 гг. для территории Курской области и Республики Крым. Лучшей оказалась мультисезонная мультимодальная модель, обученная по данным за пять сезонов вегетации с ошибкой MAE (*англ.* mean absolute error), равной 4,2 дня, при этом ошибка не зависела от типа культуры, что говорит в пользу обобщающих способностей модели. Кроме этого, модель была апробирована для неизвестной для неё территории (Оренбургская область) и сезона вегетации (2023), для чего был создан информационный продукт даты сева с пространственным разрешением 60 м, и средняя абсолютная ошибка оценки даты составила 5,8 дня. Необходимо дальнейшее исследование генерализующей способности мультисезонной модели с подключением дополнительных сезонов вегетации.

Ключевые слова: LOWESS, KMCC, LSTM, мультисезоная модель, яровые культуры, дата сева

Одобрена к печати: 17.10.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-114-125

Введение

Автоматическое определение ретроспективной даты сева сельскохозяйственных культур на основе высокодетальных спутниковых данных — важный этап информационного обеспечения дистанционного мониторинга, который даёт возможность контроля агротехнических мероприятий, оценки качества посевных работ, раннего прогнозирования развития культур и оценки их состояния. Для крупных сельскохозяйственных производителей независимый дистанционный контроль фактической даты сева на всех полях их хозяйств предоставляет возможность заблаговременно планировать логистические операции по перемещению сельхозтехники. Кроме этого, возможность автоматической оценки даты сева на больших территориях позволяет идентифицировать последствия неоптимального проведения агротехнических мероприятий, оценивать их масштаб и влияние на региональную продовольственную безопасность, повышая информированность органов управления, сельхозпроизводителей и экологов с учётом тенденций на сдвиг начала сезона вегетации из-за наблюдаемых изменений климата (Guralnick et al., 2024; Stemkovski et al., 2023). Систематическая разница между наблюдаемыми по спутниковым данным показателями и рекомендуемой многолетней для региона датой сева может также быть индикатором климатических изменений и основанием для рекомендации по пересмотру региональных норм.

Системы дистанционного мониторинга (Лупян и др., 2021, 2025; Плотникова и др., 2024; Пономарев и др., 2017; Толпин и др., 2019; Хамедов, Мазуров, 2015) опираются на использование спутниковых данных, которые являются одним из наиболее эффективных источников информации (Подольская, 2024) для решения ключевых задач на больших территориях,

включая картографирование (Ёлкина и др., 2024; Плотников и др., 2018а, 2024; Hermosilla et al., 2022; Waldner et al., 2019), оценку состояния (Дунаева и др., 2019; Савин и др., 2011; Середа и др., 2020; Страшная и др., 2014; Трошко и др., 2021) и биофизических характеристик (Плотников и др., 2025; Шабанов и др., 2018) растительного покрова. Развитие в ИКИ РАН методов и технологий восстановления временных серий высокого временного разрешения для различных спутниковых систем с использованием весового подхода (Плотников и др., 2018б; Plotnikov et al., 2022), пространственно-временного анализа (Гаврилюк и др., 2018) и гармонической регрессии (Ёлкина, Плотников, 2024) позволяет повысить точность распознавания таких высокодинамичных классов, как сельскохозяйственная растительность на пахотных землях.

Кроме этого, высокие показатели оперативности, пространственной и временной детализации спутниковой информации позволяют использовать дистанционное зондирование для параметризации имитационных моделей, традиционно ограниченных качеством и разрешением почвенных и погодных данных. Отсутствие в свободном доступе для больших неоднородных территорий и за различные сезоны вегетации информации о дате сева сельскохозяйственных культур затрудняет корректную ассимиляцию спутниковых наблюдений в модели развития культур.

Помимо методов и подходов, основанных на пороговых значениях абсолютных величин или прироста дистанционных индикаторов (You et al., 2013), одним из популярных алгоритмов для этих целей выступает TIMESAT (Eklundh, Jönsson, 2015), использующий приближение временных рядов спутниковых данных различными аналитическими функциями. В основе TIMESAT лежат относительно простые и легко интерпретируемые подходы, на базе которых развились различные модификации, включая приближение временных рядов полиномами, сигмоидами и логистическими функциями, а также вейвлет-анализ временных серий. Наконец, необходимо отметить развитие методов оценки фенологии на основе машинного обучения и нейросетей (SVM (*англ.* Support Vector Machine), RF (*англ.* Random Forest), LSTM (*англ.* Long Short-Term Memory)), при этом они требуют наличие хорошо представленной обучающей выборки (Liu et al., 2023; Zhang et al., 2021). В зависимости от временного разрешения спутниковой системы, принципов её работы и метода оценки ошибка определения фенологических фаз культурной растительности роста варьирует от 5–10 дней до 2–3 недель (Jain et al., 2016; Jin et al., 2019).

Российская спутниковая система «Метеор-М» с приборами серии КМСС (Комплекс многозональной спутниковой съёмки) на борту позволяет получать изображения земной поверхности в видимом диапазоне с периодом повторяемости наблюдений 3–5 дней и пространственным разрешением 60 м (Жуков и др., 2021; Плотников и др., 2022; Полянский и др., 2019; Plotnikov et al., 2023). Информативность восстановленных временных рядов ежедневных композитных изображений КМСС для определения фенологических характеристик сельскохозяйственной растительности ранее не обсуждалась в научной литературе. Цель данного исследования заключается в разработке и оценке точности метода дистанционного определения ретроспективной (фактической) даты сева яровых культур на основе нейросетевой модели LSTM, а также разносезонных серий спутниковых данных КМСС и метеорологических индикаторов высокого временного разрешения при естественной вариабельности почвенно-климатических условий.

Данные

Ежедневные мультиспектральные композитные изображения КМСС с пространственным разрешением 60 м формируются с помощью ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» на основе данных уровня обработки L2A (Plonikov et al., 2023). Эти продукты позволяют формировать сезонные и многолетние ряды высокого временного разрешения в видимом и инфракрасном диапазонах. В работе использовались восстановленные ежедневные изображения КМСС за 2018–2022 гг. на территорию Курской области и Республики Крым, а также Оренбургской области за 2023 г.

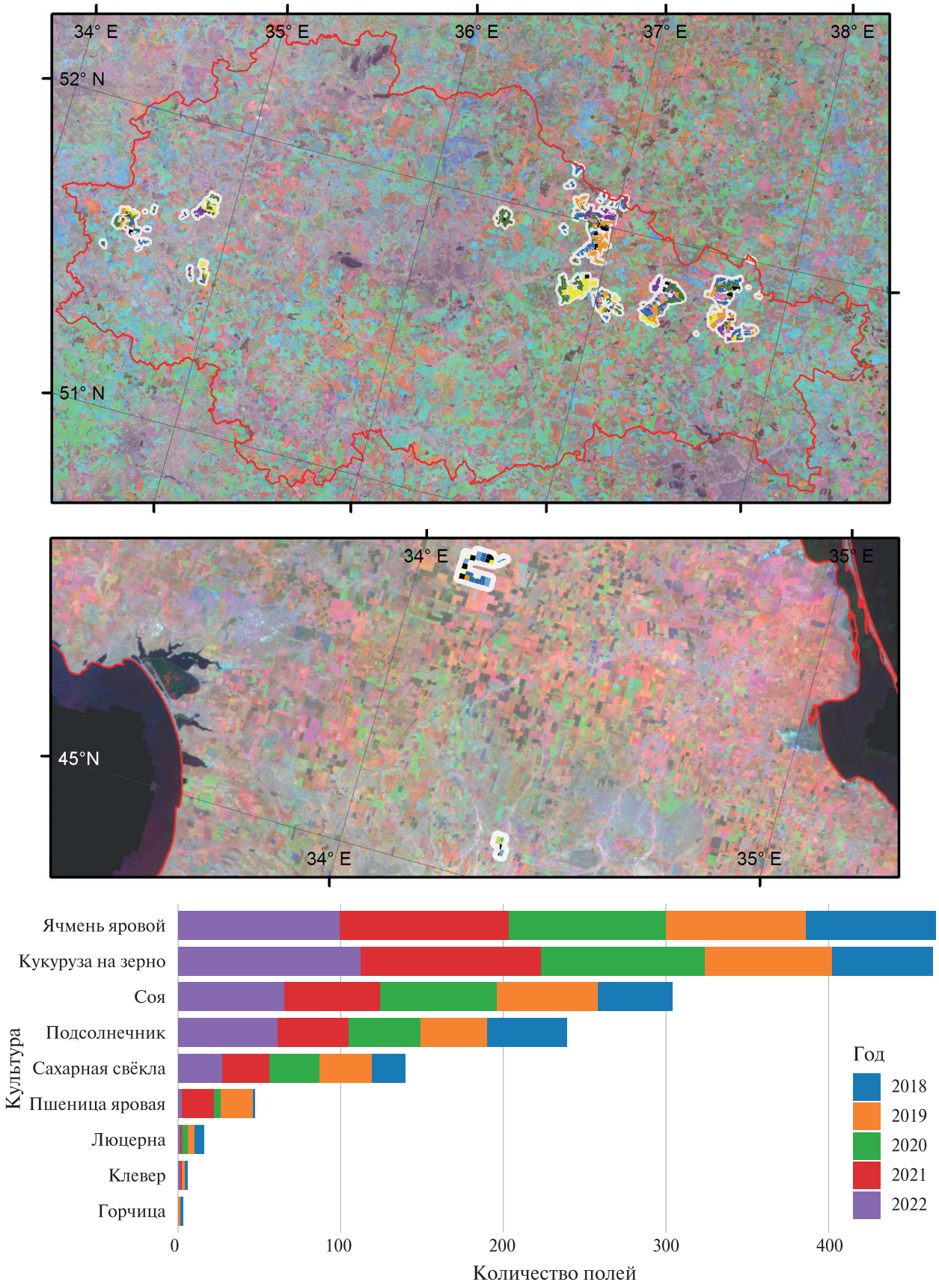

Рис. 1. Разновременной синтез ежедневных восстановленных изображений KMCC в канале NIR (*англ.* near infrared) (R — 150-й день, G — 200-й день, B — 250-й день 2022 г.) с наложением сверху полей обучающей выборки для Курской области (*вверху*) и Республики Крым (*посередине*), а также статистика обучающих данных в разрезе культур и лет (*внизу*)

В качестве источника агроклиматической информации о влажности и температуре верхнего слоя почвы были использованы 6-часовые данные NCEP (*англ.* National Centers for Environmental Prediction) с пространственным разрешением 0,5° (https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html).

Используемая в работе наземная информация соответствовала сезонам вегетации с 2018 по 2022 г. и содержала геопространственные данные о размещении (*рис. 1*, см. с. 116), фенологии, агротехнике, урожайности и других характеристиках более 1600 засеянных различными яровыми культурами участков на территории Республики Крым, Курской и Оренбургской областей, включая информацию о датах наступления основных фенофаз, в том числе дату сева. Из анализа были исключены озимые культуры целевого сезона уборки, многолетние травы посевов прошлых лет и участки чистого пара.

Методы

Формирование ежедневных безоблачных мультиспектральных изображений KMCC (продукт HiTSE (*англ.* Historical Time Series Enhancement)) осуществляется на основе снимков обработки уровня L2A с последующей их интерполяцией методом LOWESS (*англ.* Locally Weighted Scatterplot Smoothing) (Plotnikov et al., 2022) в автоматическом режиме на территорию сельскохозяйственной зоны РФ.

Агроклиматические индикаторы данных реанализа NCEP для соответствующих лет и регионов, включающие влажность и температуру верхнего слоя почвы, усреднялись скользящим окном шириной в пять дней.

В качестве базовой архитектуры нейросети была выбрана двунаправленная LSTM (*англ.* Bi-Directional LSTM), позволяющая учитывать проблему исчезающего градиента и использовать полный контекстный анализ долгосрочных зависимостей. Модель принимала на вход временные ряды спутниковых и агроклиматических индикаторов, а для её оптимизации применялась библиотека Keras Tuner (*рис. 2*).

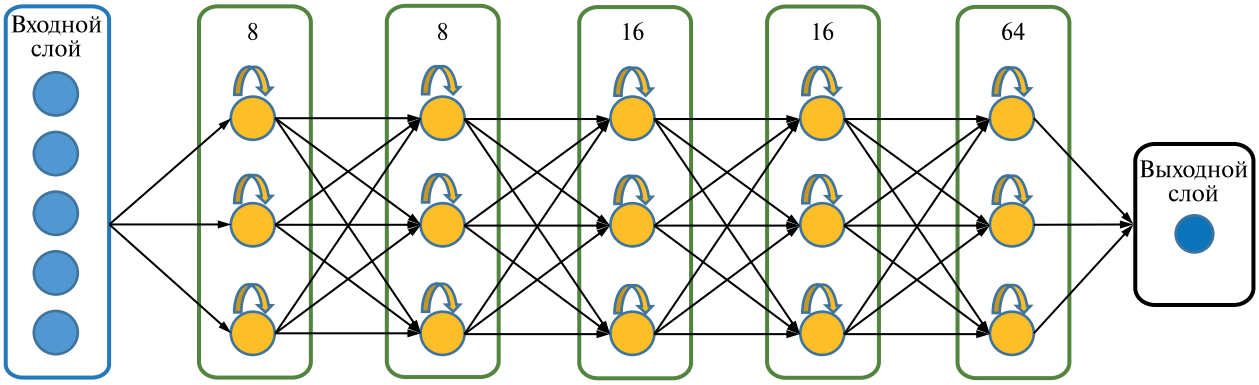

Рис. 2. Блок-схема оптимизированной архитектуры Bi-LSTM для оценки даты сева сельскохозяйственных культур; зелёным контуром обозначены скрытые слои, числа сверху слоёв соответствуют числу узлов в слое

Используемая методология предусматривала проведение серии экспериментов с контролем точности определения даты сева с помощью метрики MAE (*англ.* mean absolute error) на основе тестовой подвыборки. Объектом оценки являлись мультисезонные модели, построенные только на основе разносезонных данных дистанционного зондирования Земли, и мультисезонные мультимодальные модели, которые дополнительно использовали соответствующие агроклиматические индикаторы. Проведённые эксперименты были нацелены 1) на исследование устойчивости мультисезонной модели при работе на незнакомом ей сезоне, 2) изучение дополнительной информативности агроклиматических индикаторов в мультимо-

дальных моделях. В процессе исследования устойчивости мультисезонной модели выполнялось обучение на четырёх сезонах из пяти, а на пятом проводилось тестирование с формированием метрики средней абсолютной ошибки MAE (подход кросс-валидации Leave-one-out или схема 4+1 в *табл. 1*). Кроме этого, для каждого из двух указанных выше видов экспериментов была обучена и изучена мультисезонная модель «полного набора», которая использовала данные всех сезонов вегетации (*табл. 1*). При обучении по схеме 4+1 вся выборка из четырёх сезонов была поделена на обучающий и валидационный поднаборы, а тестовым поднабором являлась вся выборка оставшегося пятого сезона; этот эксперимент повторялся пять раз — для каждого из сезонов. При обучении по схеме полного набора вся выборка пяти сезонов была поделена на обучающий, валидационный и тестовый поднаборы.

Необходимо отметить, что разделение на поднаборы происходило на уровне объектов (целых полей) в целях предотвращения искусственного завышения точности получаемых результатов из-за скоррелированности поднаборов выборки, которое неизбежно происходит при разделении поднаборов на уровне пикселей, в процессе чего один тот же логически неделимый объект (засеянное одной культурой поле) фактически мог попасть в разделяемые поднаборы. Разделение выборки между обучающим, валидационным и тестовым поднаборами на уровне объектов происходило в соотношении 80:10:10. Единицей выборки при этом являлся пиксель KMCC с разрешением 60 м и соответствующие ему метрики. Помимо агрегации данных о характеристиках полученных моделей в виде таблицы, для лучшей модели были построены гистограммы распределения знаковой ошибки и тепловая диаграмма рассеяния при оценке даты на уровне отдельных пикселей.

Результаты

Оптимизированная модель Bi-LSTM была обучена для каждого эксперимента из списка в *табл. 1* с применением соответствующего набора обучающих и валидационных данных. Как отмечено выше, параллельный блок экспериментов касался мультимодальных моделей, которые дополнительно использовали метрики, полученные на основе временных рядов агроклиматических данных. Таким образом, были получены оценки суммарно 12 моделей, 5 из которых являлись мультисезонными (применяли только спутниковые данные, второй столбец *табл. 1*), ещё 5 — мультисезонными и мультимодальными (использовали, помимо спутниковой, также и агроклиматическую информацию, третий столбец *табл. 1*), а также оба варианта для модели полного набора (нижняя строка *табл. 1*).

Таблица 1. Характеристики моделей оценки даты сева для изучаемых схем и моделей

Схема	MAE для мультисезонной модели, дни	MAE для мультисезонной и мультимодальной модели, дни
4+1 для 2018 г.	6,4	7,1
4+1 для 2019 г.	9,4	13,3
4+1 для 2020 г.	14,4	13,7
4+1 для 2021 г.	6,9	7,4
4+1 для 2022 г.	10,8	26,7
Полный набор	6,1	4,2

Можно заметить, что лучшими моделями оказались модели полного набора. Кроме этого, отмечается тенденция систематического отставания в точности оценки даты сева для мультимодальных моделей схемы 4+1, однако лучшей из двух моделей полного набора оказалась, наоборот, мультимодальная модель. Тепловая диаграмма рассеяния оценки даты сева для лучшей модели с ошибкой MAE 4,2 дня представлена на *рис. 3* (см. с. 119).

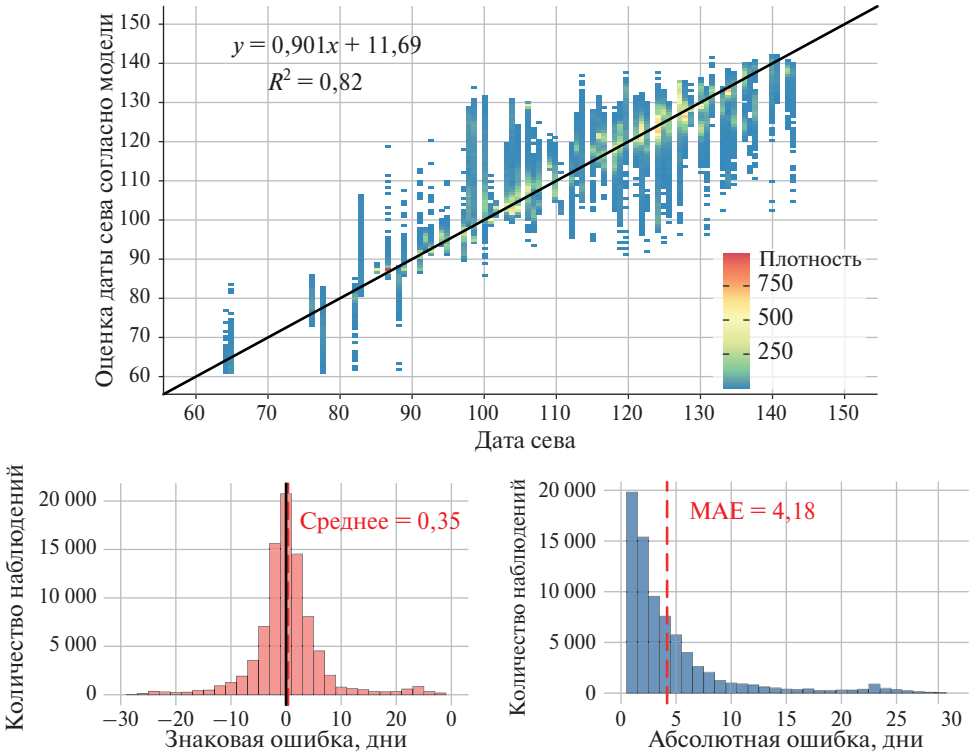

Рис. 3. Тепловая диаграмма рассеяния при сравнении наземной и модельной даты сева для лучшей модели из *табл. 1* на уровне отдельных пикселей каждого поля из тестовой подвыборки, опорная прямая $y = x$ (чёрный цвет), уравнение и коэффициент R^2 регрессионной прямой (*вверху*), а также гистограммы знаковой (*слева внизу*) и абсолютной (*справа внизу*) ошибок оценки даты сева

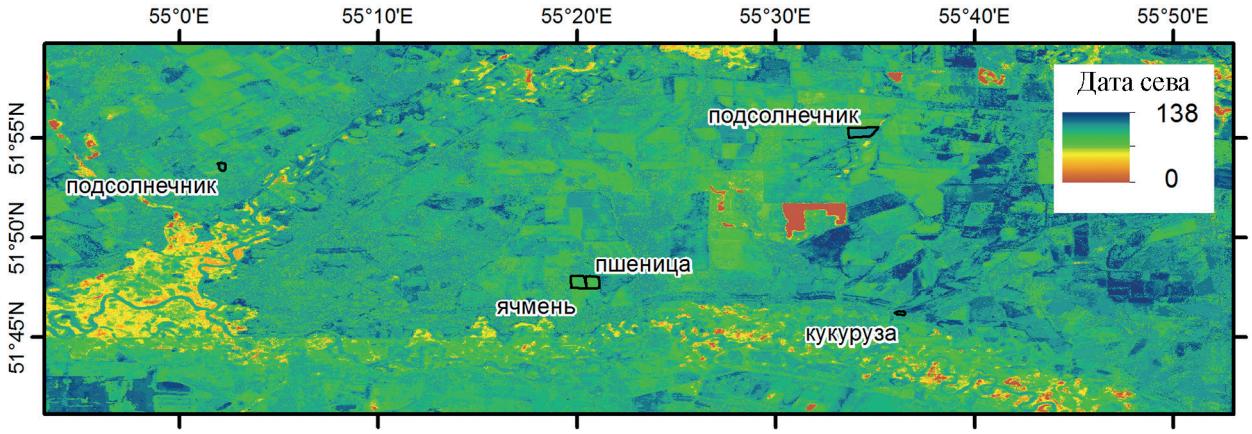

Рис. 4. Карта модельной оценки ретроспективной даты сева яровых культур (номер дня в году) участка Оренбургской области за 2023 г., полученная по данным КМСС с пространственным разрешением 60 м; для корректной интерпретации этого продукта необходимо дополнительное использование маски яровых культур

Данные полевых обследований Оренбургской области были представлены небольшим количеством полей и их подключение к обучающему набору слабо влияло на результаты моделирования, поэтому эти данные не использовались в обучении и калибровке модели. С другой стороны, эти данные оказываются удобным независимым тестовым набором для объективной оценки моделей, обученных для работы на других территориях, в данном случае в Республике Крым и Курской области.

Подготовленные соответствующим образом спутниковые данные КМСС и агроклиматические данные NCEP за 2023 г. на территорию Оренбургской области были использованы

для расчёта модельной оценки даты сева для каждого 60-метрового пикселя, в результате чего было получено изображение фактической даты сева (*рис. 4*, см. с. 119). Результаты попиксельной оценки даты сева осреднялись для каждого из пяти полей и сопоставлялись с данными наземных обследований (*табл. 2*). Средняя абсолютная ошибка оценки даты сева для пяти полей из четырёх культур составила 5,8 дня.

Таблица 2. Сравнение модельной оценки и фактической даты сева яровых культур на обследованных полях Оренбургской области в 2023 г.

Поле №	Культура	Модель (номер дня в году)	Факт (номер дня в году)
1	Ячмень	126	136
2	Пшеница	125	128
3	Кукуруза	130	135
4	Подсолнечник	128	135
5	Подсолнечник	130	134

Заключение

Таким образом, в настоящей работе представлен метод и результаты спутниковой оценки фактической даты сева яровых культур за различные сезоны вегетации для регионов Курской области, Оренбургской области и Республики Крым, находящихся в различных почвенно-климатических условиях, на основе данных КМСС. Показано, что восстановленные серии ежедневных безоблачных изображений КМСС с пространственным разрешением 60 м совместно с агроклиматическими индикаторами NCEP позволяют выполнять оценку даты сева яровых культур со средней абсолютной ошибкой 4,2 дня.

Выполнена оценка точности результатов, полученных мультисезонными и мультимодальными моделями архитектуры Bi-LSTM. Отметим, что схемы 4+1 и схема полного набора различаются по условиям: в первом случае модель не видит тестируемый сезон с точки зрения его климатических особенностей, а во втором — видит; и хотя метеорологические данные соответствуют другим объектам, с учётом низкого разрешения погодных данных, отличия в этих метриках между объектами являются минимальными. Учитывая размах ошибок в схемах 4+1, можно сделать вывод, что в задаче точного определения даты сева критически важным является доступ к максимально возможной вариабельности сезонных агроклиматических условий произрастания культур. При этом требуется дальнейшая оценка генерализующей способности мультисезонной Bi-LSTM-модели с подключением дополнительных сезонов вегетации в целях уточнения оценки даты сева тестового (целевого) сезона вегетации, поскольку максимальная точность в рамках проведённых экспериментов достигается для мультимодальной модели полного набора. Распределение знаковых ошибок модели является выраженным одномодальным, что означает отсутствие связи ошибки с типом сельскохозяйственной культуры и позволяет говорить об универсальности полученной модели.

В настоящее время полученный на основе мультисезонной мультимодальной модели информационный продукт ретроспективной даты сева формируется на большую часть зернового пояса РФ в целях обеспечения работы методов картографирования, оценки состояния и прогнозирования урожайности ключевых сельскохозяйственных культур, в том числе с использованием имитационных моделей. Изучаются возможности оперативной оценки даты сева, включая использование оперативных серий высокого временного разрешения, полученных по данным других спутниковых систем.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-663, уникальный идентификатор 13.2251.21.0264) с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг».

Литература

1. *Гаврилюк Е. А.*, *Плотникова А. С.*, *Плотников Д. Е.* Картографирование наземных экосистем Печоро-Илычского заповедника и его окрестностей на основе восстановленных мультивременных спутниковых данных Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 141–153. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-141-153.
2. *Дунаева Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Хвостиков С. А. и др.* Использование данных дистанционного зондирования для ранней диагностики наступления засушливых условий // Таврический вестн. аграрной науки. 2019. № 4(20). С. 28–45. DOI: 10.33952/2542-0720-2019-4-20-28-45.
3. *Ёлкина Е. С.*, *Плотников Д. Е.* Построение серий NDVI высокого временного разрешения по данным Landsat для оценки тридцатилетней динамики используемой пашни // 11-я Международ. науч. конф. «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». Красноярск: СФУ, 2024. С. 155–159.
4. *Ёлкина Е. С.*, *Плотников Д. Е.*, *Дунаева Е. А.* Обнаружение возможности дистанционного распознавания орошаемых земель Республики Крым на основе спектрально-временных и температурных признаков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 379–386. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-379-386.
5. *Жуков Б. С.*, *Кондратьева Т. В.*, *Полянский И. В.* Межгодовой тренд чувствительности камер комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 по результатам полётной калибровки в 2015–2020 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 53–60. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-53-60.
6. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А. и др.* Система «Вега-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 9–31. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
7. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Толпин В. А.* Система «ВЕГА-Science»: возможности работы с данными спутниковых наблюдений Земли для решения научных и прикладных задач // Земля и Вселенная. 2025. № 1–2(361–362). С. 66–85. DOI: 10.7868/S0044394825010050.
8. *Плотников Д. Е.*, *Колбудаев П. А.*, *Барталев С. А.*, *Лупян Е. А.* (2018а) Автоматическое распознавание используемых пахотных земель на основе сезонных временных серий восстановленных изображений Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 112–127. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-112-127.
9. *Плотников Д. Е.*, *Хвостиков С. А.*, *Барталев С. А.* (2018б) Метод автоматического распознавания сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных и имитационной модели развития растений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 131–141. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-131-141.
10. *Плотников Д. Е.*, *Колбудаев П. А.*, *Лупян Е. А.* Автоматический метод субпиксельной географической привязки спутниковых изображений КМСС-М на основе актуализируемого эталона низкого пространственного разрешения // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46. № 5. С. 818–827. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1098.
11. *Плотников Д. Е.*, *Бойматов Ю. Ш.*, *Ёлкина Е. С. и др.* Оценка эффективности мультисезонных моделей машинного обучения для оперативного распознавания озимых культур на больших территориях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 116–129. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-116-129.
12. *Плотников Д. Е.*, *Чжоу Ц.*, *Колбудаев П. А. и др.* Разработка и оценка индекса листовой поверхности LAI растительного покрова России на основе разноугловых наблюдений КМСС (Метеор-М) и нейросетевой инверсии модели PROSAIL // Компьютерная оптика. 2025. Т. 49. № 3. С. 504–518. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1621.
13. *Плотникова А. С.*, *Хамедов В. А.*, *Архипцева Е. А. и др.* Обзор российских геоинформационных сервисов природоохранной тематики на основе открытого программного обеспечения // Геоинформатика. 2024. № 4. С. 4–20. DOI: 10.47148/1609-364X-2024-4-4-20.
14. *Подольская Е. С.* Геоинформационные технологии в интеллектуальных системах как дисциплина в программе подготовки студентов по специальности «Картография и геоинформатика» // Геодезия и картография. 2024. № 8. С. 51–60. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1010-8-51-60.
15. *Полянский И. В.*, *Жуков Б. С.*, *Кондратьева Т. В. и др.* Комплекс многозональной спутниковой съёмки среднего разрешения для гидрометеорологических космических аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 83–92. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-83-92.
16. *Пономарев Е. И.*, *Харук В. И.*, *Якимов Н. Д.* Результаты и перспективы спутникового мониторинга природных пожаров Сибири // Сибирский лесной журн. 2017. № 5. С. 25–36.

17. *Савин И. Ю.*, *Барталев С. А.*, *Лупян Е. А.*, *Толпин В. А.*, *Медведева М. А.*, *Плотников Д. Е.* Спутниковый мониторинг воздействия засухи на растительность (на примере засухи 2010 года в России) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 150–162.
18. *Середа И. И.*, *Денисов П. В.*, *Трошко К. А. и др.* 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-304-310.
19. *Страшная А. И.*, *Барталев С. А.*, *Максименкова Т. А. и др.* Агрометеорологическая оценка состояния озимых зерновых культур в период прекращения вегетации с использованием наземных и спутниковых данных на примере Приволжского федерального округа // Тр. Гидрометеорол. научно-исследоват. центра Российской Федерации. 2014. № 351. С. 85–107.
20. *Толпин В. А.*, *Барталев С. А.*, *Ёлкина Е. С. и др.* Информационная система VEGA-GEOGLAM — инструмент разработки методов и подходов использования данных спутникового дистанционного зондирования в интересах решения задач глобального сельскохозяйственного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 183–197. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-183-197.
21. *Трошко К. А.*, *Денисов П. В.*, *Лупян Е. А. и др.* Особенности состояния зерновых культур в регионах европейской части России и Сибири в июне 2021 г. по данным дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 325–331. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-325-331.
22. *Хамедов В. А.*, *Мазуров Б. Т.* Разработка методических вопросов создания системы спутникового мониторинга состояния лесных экосистем в условиях воздействия нефтегазового комплекса территории Западной Сибири // Вестн. СГУГиТ (Сибирского гос. ун-та геосистем и технологий). 2015. № 3(31). С. 16–31.
23. *Шабанов Н. В.*, *Барталев С. А.*, *Ерошенко Ф. В.*, *Плотников Д. Е.* Развитие возможностей дистанционной оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 166–178. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178.
24. *Eklundh L.*, *Jönsson P.* TIMESAT: A software package for time-series processing and assessment of vegetation dynamics // Remote Sensing Time Series. Revealing Land Surface Dynamics. Ser. Remote Sensing and Digital Image Processing. V. 22. Springer, 2015. P. 141–158. DOI: 10.1007/978-3-319-15967-6_7.
25. *Guralnick R.*, *Crimmins T.*, *Grady E.*, *Campbell L.* Phenological response to climatic change depends on spring warming velocity // Communications Earth and Environment. 2024. V. 5. Article 634. DOI: 10.1038/s43247-024-01807-8.
26. *Hermosilla T.*, *Wulder M. A.*, *White J. C.*, *Coops N. C.* Land cover classification in an era of big and open data: Optimizing localized implementation and training data selection to improve mapping outcomes // Remote Sensing of Environment. 2022. V. 268. Article 112780. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112780.
27. *Jain M.*, *Srivastava A. K.*, *Singh B. et al.* Mapping smallholder wheat yields and sowing dates using micro-satellite data // Remote Sensing. 2016. V. 8. No. 10. Article 860. DOI: 10.3390/rs8100860.
28. *Jin Z.*, *Azzari G.*, *You C. et al.* Smallholder maize area and yield mapping at national scales with Google Earth Engine // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 228. P. 115–128. DOI: 10.1016/j.rse.2019.04.016.
29. *Liu Y.*, *Diao C.*, *Yang Z.* CropSow: An integrative remotely sensed crop modeling framework for field-level crop planting date estimation // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2023. V. 202. P. 334–355. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2023.06.012.
30. *Plotnikov D.*, *Kolbudaev P.*, *Matveev A. et al.* Daily surface reflectance reconstruction using LOWESS on the example of various satellite systems // Proc. 2022 8th Intern. Conf. Information Technology and Nanotechnology (ITNT). IEEE, 2022. 5 p. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848630.
31. *Plotnikov D. E.*, *Kolbudaev P. A.*, *Matveev A. M. et al.* Accuracy assessment of atmospheric correction of KMSS-2 Meteor-M #2.2 data over northern Eurasia // Remote Sensing. 2023. V. 15. No. 18. Article 4395. DOI: 10.3390/rs15184395.
32. *Stemkovski M.*, *Bell J. R.*, *Ellwood E. R. et al.* Disorder or a new order: How climate change affects phenological variability // Ecology. 2023. V. 104. No. 6. Article e3846. DOI: 10.1002/ecy.3846.
33. *Waldner F.*, *Schucknecht A.*, *Lesiv M. et al.* Conflation of expert and crowd reference data to validate global binary thematic maps // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 221. P. 235–246. DOI: 10.1016/j.rse.2018.10.039.
34. *You X.*, *Meng J.*, *Zhang M.*, *Dong T.* Remote sensing based detection of crop phenology for agricultural zones in China using a new threshold method // Remote Sensing. 2013. V. 5. No. 7. P. 3190–3211. DOI: 10.3390/rs5073190.

35. *Zhang M.*, *Abrahao G.*, *Cohn A. et al.* A MODIS-based scalable remote sensing method to estimate sowing and harvest dates of soybean crops in Mato Grosso, Brazil // Heliyon. 2021. V. 7. No. 7. Article e07436. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07436.

Satellite assessment of actual sowing date for spring crops based on neural network model and multispectral KMSS sensor data series of high temporal resolution

D. E. Plotnikov [1], P. A. Kolbudaev [1], E. S. Elkina [1], Ie. A. Dunaieva [2]

[1] *Space Research Institute RAS*, *Moscow 117997*, *Russia*
E-mail: dmitplot@d902.iki.rssi.ru
[2] *Research Institute of Agriculture of Crimea*, *Simferopol 295043*, *Russia*

An assessment of the informativeness of daily-resolution KMSS (multispectral satellite survey complex) multispectral satellite data series and NCEP (National Centers for Environmental Prediction) reanalysis data for the remote determination of the actual sowing date of spring crops using a Bi-LSTM (Bi-Directional Long Short-Term Memory) neural network model is presented. The study includes a series of experiments to compare the effectiveness of a number of multi-seasonal and multimodal neural network models using multi-year satellite, agro-climatic, and field data for the 2018–2022 growing seasons in Kursk Oblast and the Republic of Crimea. The best-performing model was a multi-seasonal multimodal model trained on five growing seasons, achieving a MAE (mean absolute error) of 4.2 days regardless of the crop type, indicating the model's generalizing power. Furthermore, the model was tested on yet unseen area (Orenburg Oblast) and growing season (2023), for which a sowing date information product with a spatial resolution of 60 meters was generated, resulting in MAE of 5.8 days. Further evaluation of the multi-seasonal model's generalization capability with the inclusion of additional growing seasons is required.

Keywords: LOWESS, KMSS, LSTM, multiseasonal model, spring crops, sowing date

Accepted: 17.10.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-114-125

References

1. Gavrilyuk E. A., Plotnikova A. S., Plotnikov D. E., Land cover mapping of the Pechora-Ilych Nature Reserve and its vicinity based on reconstructed multitemporal Landsat satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 5, pp. 141–153 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-141-153.
2. Dunaeva Ie. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A. et al., Use of remote sensing data for early diagnosis of drought conditions onset, *Tavricheskii vestnik agrarnoi nauki*, 2019, No. 4(20), pp. 28–45 (in Russian), DOI: 10.33952/2542-0720-2019-4-20-28-45.
3. Elkina E. S., Plotnikov D. E., Construction of high temporal resolution NDVI series from Landsat data for assessment of thirty-year dynamics of arable land use, *11-ya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya "Regional'nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli"* (11th Inretn. Scientific Conf. "Regional problems of remote sensing of the Earth"), Krasnoyarsk: SFU, 2024, pp. 155–159 (in Russian).
4. Elkina E. S., Plotnikov D. E., Dunaeva Ie. A., Discovering the possibility for irrigated lands identification with remote sensing data over Republic of Crimea based on spectral-temporal and thermal features, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 5, pp. 379–386 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-379-386.
5. Zhukov B. S., Kondratieva T. V., Polyanskiy I. V., Interannual sensitivity trend of the cameras of the multispectral satellite imaging system KMSS-M on Meteor-M No. 2 spacecraft based on the in-flight calibration

in 2015–2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 1, pp. 53–60 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-53-60.
6. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., Vega-Science system: design features, main capabilities and usage experience, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 6, pp. 9–31 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
7. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Tolpin V. A., VEGA-Science system: capabilities of working with Earth satellite observation data for solving scientific and applied problems, *Zemlya i Vselennaya*, 2025, No. 1–2(361–362), pp. 66–85 (in Russian), DOI: 10.7868/S0044394825010050.
8. Plotnikov D. E., Kolbudaev P. A., Bartalev S. A., Loupian E. A. (2018a), Automated annual cropland mapping from reconstructed time series of Landsat data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 2, pp. 112–127 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-112-127.
9. Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Bartalev S. A. (2018b), Method for automated crop types mapping using remote sensing data and a plant growth simulation model, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 4, pp. 131–141 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-131-141.
10. Plotnikov D. E., Kolbudaev P. A., Loupian E. A., Automatic method for subpixel geographic referencing of KMSS-M satellite images based on an updatable low spatial resolution reference, *Computer Optics*, 2022, V. 46, No. 5, pp. 818–827 (in Russian), DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1098.
11. Plotnikov D. E., Boimatov Yu. Sh., Elkina E. S. et al., Performance assessment of multi-season machine learning models for large-scale in-season winter crops mapping, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 5, pp. 116–129 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-116-129.
12. Plotnikov D. E., Zhou C., Kolbudaev P. A. et al., Development and assessment of the leaf area index LAI of Russian vegetation cover based on multi-angle KMSS (Meteor-M) observations and neural network inversion of the PROSAIL model, *Computer Optics*, 2025, V. 49, No. 3, pp. 504–518 (in Russian), DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1621.
13. Plotnikova A. S., Khamedov V. A., Arkhiptseva E. A. et al., Review of Russian geoinformation services on environmental topics based on open software, *Geoinformatika*, 2024, No. 4, pp. 4–20 (in Russian), DOI: 10.47148/1609-364X-2024-4-4-20.
14. Podolskaya E. S., Geoinformation technologies in intelligent systems as a discipline in the training program for students in the specialty "Cartography and geoinformatics", *Geodeziya i kartografiya*, 2024, No. 8, pp. 51–60 (in Russian), DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1010-8-51-60.
15. Polyanskiy I. V., Zhukov B. S., Kondratieva T. V. et al., Medium-resolution multispectral satellite imaging system for hydrometeorological spacecraft, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 6, pp. 83–92 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-83-92.
16. Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Yakimov N. D., Results and prospects of satellite monitoring of natural fires in Siberia, *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 5, pp. 25–36 (in Russian).
17. Savin I. Yu., Bartalev S. A., Loupian E. A., Tolpin V. A., Medvedeva M. A., Plotnikov D. E., Satellite monitoring of vegetation affected by drought (using drought 2010 in Russia as an example), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, V. 8, No. 1, pp. 150–162 (in Russian).
18. Sereda I. I., Denisov P. V., Troshko K. A. et al., 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, V. 17, No. 5, pp. 304–310 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-304-310.
19. Strashnaya A. I., Bartalev S. A., Maksimenkova T. A. et al., Agrometeorological assessment of the state of winter grain crops during the cessation of vegetation using ground and satellite data on the example of the Volga Federal District, *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiiskoi Federatsii*, 2014, No. 351, pp. 85–107 (in Russian).
20. Tolpin V. A., Bartalev S. A., Elkina E. S. et al., The VEGA-GEOGLAM information system: a tool for the development of methods and approaches for using satellite remote sensing data in problem-solving tasks of global agricultural monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 3, pp. 183–197 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-183-197.
21. Troshko K. A., Denisov P. V., Loupian E. A. et al., The state of grain crops in the European part of Russia and Siberia in June 2021 based on remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 3, pp. 325–331 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-325-331.
22. Khamedov V. A., Mazurov B. T., Development of methodological issues for creating a system of satellite monitoring of the state of forest ecosystems under the impact of the oil and gas complex in the territory of Western Siberia, *Vestnik SGUGiT* (*Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologii*), 2015, No. 3(31), pp. 16–31 (in Russian).

23. Shabanov N. V., Bartalev S. A., Eroshenko F. V., Plotnikov D. E., Development of capabilities for remote sensing estimate of Leaf Area Index from MODIS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 4, pp. 166–178 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178.
24. Eklundh L., Jönsson P., TIMESAT: A software package for time-series processing and assessment of vegetation dynamics, In: *Remote Sensing Time Series. Revealing Land Surface Dynamics*, Ser. Remote Sensing and Digital Image Processing, V. 22, Springer, 2015, pp. 141–158, DOI: 10.1007/978-3-319-15967-6_7.
25. Guralnick R., Crimmins T., Grady E., Campbell L., Phenological response to climatic change depends on spring warming velocity, *Communications Earth and Environment*, 2024, V. 5, Article 634, DOI: 10.1038/s43247-024-01807-8.
26. Hermosilla T., Wulder M. A., White J. C., Coops N. C., Land cover classification in an era of big and open data: Optimizing localized implementation and training data selection to improve mapping outcomes, *Remote Sensing of Environment*, 2022, V. 268, Article 112780, DOI: 10.1016/j.rse.2021.112780.
27. Jain M., Srivastava A. K., Singh B. et al., Mapping smallholder wheat yields and sowing dates using micro-satellite data, *Remote Sensing*, 2016, V. 8, No. 10, Article 860, DOI: 10.3390/rs8100860.
28. Jin Z., Azzari G., You C. et al., Smallholder maize area and yield mapping at national scales with Google Earth Engine, *Remote Sensing of Environment*, 2019, V. 228, pp. 115–128, DOI: 10.1016/j.rse.2019.04.016.
29. Liu Y., Diao C., Yang Z., CropSow: An integrative remotely sensed crop modeling framework for field-level crop planting date estimation, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, V. 202, pp. 334–355, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2023.06.012.
30. Plotnikov D., Kolbudaev P., Matveev A. et al., Daily surface reflectance reconstruction using LOWESS on the example of various satellite systems, *Proc. 2022 8th Intern. Conf. Information Technology and Nanotechnology* (*ITNT*), IEEE, 2022, 5 p., DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848630.
31. Plotnikov D. E., Kolbudaev P. A., Matveev A. M. et al., Accuracy assessment of atmospheric correction of KMSS-2 Meteor-M #2.2 data over northern Eurasia, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, No. 18, Article 4395, DOI: 10.3390/rs15184395.
32. Stemkovski M., Bell J. R., Ellwood E. R. et al., Disorder or a new order: How climate change affects phenological variability, *Ecology*, 2023, V. 104, No. 6, Article e3846, DOI: 10.1002/ecy.3846.
33. Waldner F., Schucknecht A., Lesiv M. et al., Conflation of expert and crowd reference data to validate global binary thematic maps, *Remote Sensing of Environment*, 2019, V. 221, pp. 235–246, DOI: 10.1016/j.rse.2018.10.039.
34. You X., Meng J., Zhang M., Dong T., Remote sensing based detection of crop phenology for agricultural zones in China using a new threshold method, *Remote Sensing*, 2013, V. 5, No. 7, pp. 3190–3211, DOI: 10.3390/rs5073190.
35. Zhang M., Abrahao G., Cohn A. et al., MODIS-based scalable remote sensing method to estimate sowing and harvest dates of soybean crops in Mato Grosso, Brazil, *Heliyon*, 2021, V. 7, No. 7, Article e07436, DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07436.