

Оценка влияния орошения на продуктивность кукурузы методами дистанционного зондирования

Р. В. Калиниченко¹, А. Ю. Романовская¹, А. Е. Беденко²

¹ Почвенный институт им. В. В. Докучаева, Москва, 119017, Россия
E-mail: kalinichenko_rv@esoil.ru

² Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», Коломна, Московская обл., 140483, Россия
E-mail: timbothdoom@gmail.com

Дефицит влаги в критические фазы развития кукурузы на юге России превращает выращивание этой стратегической культуры в рискованное предприятие. Исследование на базе сельхозпредприятия в Краснодарском крае показало, как именно искусственное орошение трансформировало биологическую продуктивность посевов в условиях засушливого лета 2025 г. Мы объединили наземные полевые обследования с потоковыми данными радиометра MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и мультиспектральной съёмкой Sentinel-2, чтобы верифицировать эффективность полива на площади 1270 га. Статистическая обработка данных подтвердила высокую значимость различий между группами по всем показателям ($p < 0,001$). Результаты подтверждают: естественных осадков (335,6 мм) не хватает для реализации генетического потенциала культуры. На богарных участках суммарное испарение (эвапотранспирация) не превысило 290 мм, что спровоцировало глубокий гидротермический стресс. В итоге урожайность на богарных землях колебалась от 0,7 до 23,7 ц/га. При этом зональная статистика выявила, что выживаемость посевов на богаре носит очаговый характер, что подтверждается высоким стандартным отклонением NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) на фоне низких средних значений. Орошение радикально меняет энергетический баланс агрофитоценоза. Дополнительная вода позволила поднять уровень эвапотранспирации до 363–432 мм, обеспечив стабильный фотосинтез. Индекс NDVI на поливных полях достигал значений 0,76–0,80. Что в сумме позволило получить 75,3–78,7 ц/га урожайности. Интеграция данных ДЗЗ и полевых наблюдений доказывает: в современных климатических реалиях региона высокопродуктивное производство кукурузы невозможно без мелиорации, а высокая корреляция ($r \geq 0,94$) подтверждает точность спутниковых индикаторов для прогнозирования урожая.

Ключевые слова: кукуруза, орошение, эвапотранспирация, MODIS, Sentinel-2, водный стресс, урожайность

Одобрена к печати: 13.05.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-206-214

Введение

Современное сельскохозяйственное производство в южных регионах России сталкивается с серьёзными вызовами, обусловленными глобальными климатическими изменениями и возрастающей частотой аномальных засушливых периодов. Кукуруза одна из наиболее стратегических культур, чья продуктивность в условиях Краснодарского края напрямую зависит от водного режима в критические фазы развития (Шуганов и др., 2025). В таких условиях актуальность мониторинга сельскохозяйственных полей не вызывает сомнений. Мониторинг орошения и оценка его эффективности — приоритет современного земледелия для получения качественного урожая (Ильинская и др., 2022).

В современных научных работах подчёркивается, что традиционные методы наземного обследования агрофитоценозов, несмотря на их высокую точность, не дают полной картины на больших площадях в режиме реального времени (Якушев и др., 2022). Поэтому агрономы всё чаще переходят на использование технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для решения задач точного земледелия и агрометеорологического прогнозирования (Kumar et al., 2021).

Применение вегетационных индексов, в частности NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), стандартно используют для оценки биометрических характеристик и фотосинтетического потенциала агроценозов (Socolini, Vizzari, 2023). Многие исследования подтверждают наличие корреляции между значениями NDVI в фазы цветения и налива зерна с итоговой биологической урожайностью (Зверьков и др., 2025; Tamás et al., 2023). Однако использование только спектральных индексов не всегда даёт исчерпывающую информацию о физиологическом состоянии растений в условиях засухи, что заставляет исследователей дополнительно изучать показатели суммарного водопотребления или эвапотранспирации (Kim et al., 2012). В ряде фундаментальных работ показано, что динамика эвапотранспирации выступает ключевым индикатором энергетического баланса посевов и позволяет с высокой точностью дифференцировать участки, находящиеся в состоянии гидротермического стресса (Allen, 2000; Pereira et al., 2015).

Особое внимание в современной литературе уделяется сравнительному анализу орошаемых и богарных агроэкосистем, где дистанционные методы позволяют точно рассчитать количество биомассы, которое добавил полив (Adriko et al., 2025). Исследователи отмечают, что сочетание спутниковых снимков и наземных данных о густоте стояния растений открывает новые возможности для выявления факторов, лимитирующих продуктивность (Kayad et al., 2019).

Несмотря на значительное количество работ в области агромониторинга, для юга России комплексных данных по связи испарения и спектральных индексов всё ещё не хватает. Разработка интегрированных подходов, объединяющих данные дистанционного зондирования, полевые наблюдения и сведения из государственных информационных систем (ЕФГИС ЗСН — Единая Федеральная Государственная информационная система земель сельскохозяйственного назначения), поможет сделать достовернее аграрную статистику (Зейлигер и др., 2019; Музылев и др., 2017). Интеграция таких данных позволяет не только оценивать текущее состояние посевов, но и выявлять закономерности адаптации агрофитоценозов к изменяющимся условиям внешней среды (Adhikary et al., 2023).

Цель настоящей работы — комплексная оценка влияния режима орошения на динамику водопотребления, вегетативное состояние и продуктивность кукурузы на зерно в условиях Тихорецкого района Краснодарского края на основе интеграции спутниковых данных и полевых обследований.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач, включающих проведение наземного мониторинга посевов с фиксацией густоты стояния и биометрических параметров, расчёт суммарной эвапотранспирации по данным MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) за вегетационный период, анализ пространственного распределения индекса NDVI на основе данных Sentinel-2, а также проведение сопряжённого анализа полученных дистанционных показателей с фактической урожайностью для обоснования эффективности применения систем искусственного орошения.

Материалы и методы

Объектом исследования послужили посевы кукурузы на зерно, расположенные на территории землепользования сельскохозяйственного предприятия ООО «КУБАНЬ-Ф» в Тихорецком районе Краснодарского края (станция Фастовецкая).

Анализ охватывал 17 полевых участков общей площадью 1270 га, характеризующихся различными режимами влагообеспеченности: часть полей возделывалась в условиях естественного увлажнения (богара), в то время как на других применялись системы искусственного орошения. В качестве базового уровня естественной влагообеспеченности за вегетационный период использовались данные о сумме эффективных осадков (335,6 мм), полученные по метеорологической станции Тихорецк через информационный ресурс Rp5.

Комплексное полевое обследование посевов проводилось 29 июля 2025 г., что соответствовало фазе развития «молочно-восковая спелость» зерна. В ходе изысканий выполнялся визуальный фитосанитарный осмотр на выявление засорённости, признаков поражения болезнями и вредителями. Густота стояния растений определялась полевым методом посред-

ством подсчёта количества растений на учётных площадках с последующим пересчётом на единицу площади (в шт/м²).

Методика определения урожайности варьировалась в зависимости от участка. Для участков 11/5, 9/7, 5/3, 2/7, 3/9, 3/15 и 11/9 удалось определить урожайность методом прямого комбайнирования 29 августа. Для остального массива исследуемых площадей использовались верифицированные данные о фактическом сборе зерна, зафиксированные в ЕФГИС ЗСН по итогам уборочной кампании.

Дистанционный мониторинг состояния посевов осуществлялся с применением облачной платформы GEE (*англ.* Google Earth Engine).

Расчёт суммарной эвапотранспирации ЕТ (*англ.* evapotranspiration) базировался на данных радиометра MODIS, в частности, использовался продукт MOD16A2 (версия/коллекция 061) с пространственным разрешением 500 м. Значения ЕТ рассчитывались агрегацией 8-дневных композитов за вегетационный период с применением соответствующих масштабирующих коэффициентов для получения физических величин в миллиметрах. Несмотря на то, что разрешение оказывается не самым детальным, алгоритм MODIS очень точно считает испарение через индекс листовой поверхности и погоду. Для задачи сравнить поливные участки с богарными — этого масштаба вполне достаточно, чтобы увидеть реальную разницу в дефиците влаги.

Для оценки пространственной неоднородности вегетативной массы и фотосинтетической активности использовался нормализованный относительный вегетационный индекс NDVI. Расчёт индекса проводился на основе мультиспектральных данных спутника Sentinel-2 (уровень обработки Surface Reflectance, продукт COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED) с пространственным разрешением 10 м. Для анализа был выбран безоблачный снимок от 28 июля 2025 г., что позволило сопоставить спутниковые данные с результатами наземных обследований, проведённых на следующий день.

Статистическая обработка и верификация полученных данных проводились в программе Jamovi. Проверка выборок на нормальность распределения осуществлялась с помощью критерия Шапиро–Уилка. Для оценки достоверности различий между группами применялись *t*-критерий Уэлча и непараметрический *U*-критерий Манна–Уитни. Анализ сопряжённости дистанционных показателей и фактической урожайности выполнялся с использованием корреляционного анализа Пирсона.

Для выявления причин сильного разброса урожайности на неорошаемых полях была проведена зональная статистика в среде QGIS (*англ.* Quantum Geographic Information Systems). Было рассчитано распределение индекса NDVI: среднее значение, стандартное отклонение, минимум, максимум и размах.

Результаты и обсуждение

В результате проведённого комплексного анализа полей ООО «КУБАНЬ-Ф» были получены количественные характеристики продуктивности и водопотребления посевов кукурузы на зерно. Сводные данные, отражающие влияние режима влагообеспеченности на эвапотранспирацию, густоту стояния, вегетационный индекс и итоговую урожайность по каждому исследуемому полю, представлены в *табл. 1*.

Анализ представленного массива данных позволяет выявить выраженную дифференциацию состояния посевов в зависимости от применения искусственного орошения. На неорошаемых участках суммарное водопотребление ЕТ лимитировалось исключительно естественным фоном осадков и составило от 227,1 до 290,7 мм. В условиях дефицита влаги на данных полях зафиксировано критическое снижение урожайности, которая варьировала в пределах от 0,7 до 23,7 ц/га при густоте стояния растений от 5,33 до 8,67 шт/м².

Включение в технологический цикл систем искусственного орошения кардинально изменило структуру формирования биомассы. Эвапотранспирация на поливных контурах выросла до 363,4–431,8 мм, обеспечив оптимальный водный режим для поддержания густоты стояния на уровне 6,67–8,67 шт/м². Как следствие, фактическая урожайность на поливных

полях достигла стабильно высоких показателей в диапазоне 75,3–78,7 ц/га. Для пространственной визуализации состояния посевов и оценки их фотосинтетического потенциала была построена карта распределения вегетационного индекса NDVI, представленная на *рис. 1*.

Таблица 1. Влияние орошения на водопотребление и состояние кукурузы

№ поля	Полив	Урожайность, ц/га	ЕТ, мм	Густота стояния растительности (29 июля), шт/м ²	NDVI (28 июля)
7/2	нет	20,4	253,3	7,00	0,35
10/14	да	77,3	421,1	8,67	0,79
10/6	да	76,5	363,4	6,67	0,76
10/15	да	78,7	419,7	7,33	0,80
10/13	да	77,2	431,8	8,67	0,77
10/12	да	75,3	395,0	7,00	0,78
7/5	нет	9,0	265,1	8,67	0,27
7/3	нет	12,6	242,1	7,00	0,31
7/4	нет	11,7	268,5	7,00	0,31
11/11	нет	23,7	266,0	5,67	0,33
5/3	нет	0,7	264,5	7,67	0,23
11/5	нет	12,2	286,0	6,33	0,34
2/7	нет	5,2	273,8	7,33	0,26
3/9	нет	2,0	245,2	8,00	0,24
3/15	нет	1,3	263,5	6,67	0,21
11/9	нет	12,1	227,1	8,67	0,34
9/7	нет	11,3	290,7	5,33	0,37



Рис. 1. Карта пространственного распределения вегетационного индекса NDVI на территории исследования по состоянию на 28 июля 2025 г.

Пространственное распределение значений NDVI явно разделило поля на две группы. На участках без полива значения индекса находились в критически низком для данной фазы развития диапазоне от 0,21 до 0,37 (Van Hoek et al., 2016), что свидетельствует о сильном температурно-водном стрессе, листья практически высохли. Напротив, орошаемые поля характеризуются высокими значениями NDVI от 0,76 до 0,80, что подтверждает наличие плотного, здорового растительного покрова с высокой фотосинтетической активностью, способного обеспечить интенсивную транспирацию.

Результаты теста Шапиро–Уилка подтвердили нормальность распределения данных для всех исследуемых параметров (уровень значимости $p > 0,05$), что обосновывает приоритетное использование параметрических методов анализа. Согласно расчётному t -критерию Уэлча, различия между орошаемыми и богарными участками по урожайности, ЕТ и индексу NDVI следует считать высокосignификантными при уровне $p < 0,001$. Статистическая достоверность данных различий также подтверждается непараметрическим U -критерием Манна–Уитни ($p \leq 0,002$).

Корреляционный анализ выявил высокую связь между фактической урожайностью зерна и дистанционными показателями состояния посевов. Коэффициент корреляции Пирсона r для пары «урожайность–NDVI» составил 0,993, а для пары «урожайность–ЕТ» — 0,942 при уровне значимости $p < 0,001$ в обоих случаях. Столь высокие значения коэффициентов свидетельствуют о сильно выраженной зависимости и подтверждают, что спектральные данные и интенсивность суммарного испарения являются точными индикаторами продуктивности кукурузы (рис. 2).

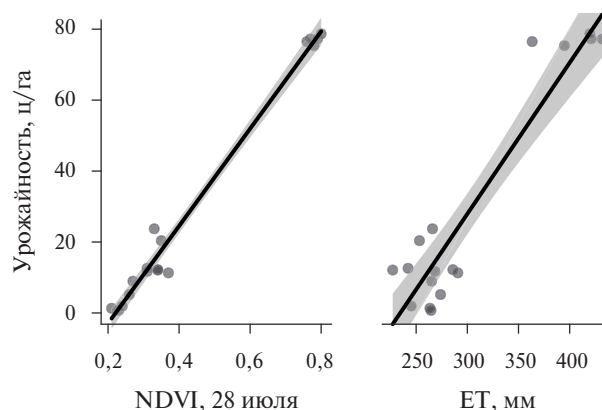


Рис. 2. Корреляция урожайности с NDVI и ЕТ

Результаты зональной статистики представлены в табл. 2.

Таблица 2. Статистика NDVI за 28 июля

№ поля	Полив	Урожайность, ц/га	Среднее	Стандартное отклонение	Минимум	Максимум	Размах
7/2	нет	20,4	0,35	0,11	0,22	0,78	0,55
10/14	да	77,3	0,79	0,13	0,27	0,87	0,60
10/6	да	76,5	0,76	0,17	0,21	0,88	0,66
10/15	да	78,7	0,80	0,13	0,35	0,91	0,56
10/13	да	77,2	0,77	0,14	0,19	0,85	0,67
10/12	да	75,3	0,78	0,11	0,33	0,86	0,53
7/5	нет	9,0	0,27	0,07	0,18	0,75	0,58
7/3	нет	12,6	0,31	0,07	0,20	0,76	0,56
7/4	нет	11,7	0,31	0,05	0,24	0,73	0,50
11/11	нет	23,7	0,33	0,05	0,22	0,48	0,26
5/3	нет	0,7	0,23	0,03	0,16	0,47	0,31
11/5	нет	12,2	0,34	0,09	0,13	0,61	0,48
2/7	нет	5,2	0,26	0,06	0,16	0,78	0,63
3/9	нет	2,0	0,24	0,05	0,16	0,54	0,38
3/15	нет	1,3	0,21	0,04	0,14	0,60	0,46
11/9	нет	12,1	0,34	0,15	0,16	0,80	0,63
9/7	нет	11,3	0,37	0,08	0,23	0,77	0,54

Анализ метрик зональной статистики позволяет выявить закономерности формирования продуктивности в условиях стресса. На богарных полях прослеживается чёткая связь между вариативностью вегетационного индекса и итоговым сбором зерна. Участки с низкими средними значениями NDVI, характеризующиеся малым стандартным отклонением (например, поле № 5/3 со стандартным отклонением, равным 0,03), закономерно демонстрируют минимальную урожайность, что свидетельствует о равномерном угнетении посевов. В то же время поля с аналогичными средними значениями, но высоким стандартным отклонением (например, поле № 11/9 со стандартным отклонением 0,15), сочетают в себе как полностью погибшие зоны, так и локальные участки с устоявшимися посевами. Именно наличие таких очагов с сохранившейся фотосинтетической активностью (максимумы NDVI до 0,80) определяет вариативность урожайности на богаре.

Высокие показатели размаха и стандартного отклонения зафиксированы также и на поливных участках. Данный факт объясняется технологическими особенностями: орошение осуществлялось круговыми дождевальными машинами, в то время как зональный анализ охватывал всю площадь прямоугольного поля, включая неорошаемые угловые сегменты. Это привело к попаданию в статистику контрастных значений — от максимально продуктивных зон внутри круга полива до угнетённых посевов за его пределами. Тем не менее наличие регулярного увлажнения позволило данным полям сформировать стабильно высокую урожайность свыше 75 ц/га, нивелируя общую неоднородность выборки.

Таким образом, сопряжённый анализ данных наглядно демонстрирует, что в исследуемых почвенно-климатических условиях достижение хорошей урожайности кукурузы на зерно продиктовано дополнительным влагообеспечением.

Заключение

Проведённое комплексное исследование позволило в полной мере оценить влияние режима влагообеспеченности на продуктивность посевов кукурузы на юге России. На основании сопряжённого анализа наземных данных и материалов дистанционного зондирования установлено, что применение систем искусственного орошения представляется определяющим фактором формирования урожая в исследуемом регионе.

Использование данных радиометра MODIS позволило зафиксировать существенную разницу в суммарном водопотреблении, где эвапотранспирация на поливных участках превысила показатели богарных участков в среднем на 100–150 мм за вегетационный период. Данный объём дополнительной влаги обеспечил поддержание оптимального состояния посевов, что подтверждается высокими значениями индекса NDVI (0,76–0,80). Напротив, на неорошаемых участках деградация фотосинтетической активности привела к падению NDVI до критически низких значений.

Статистическая обработка в среде Jamovi подтвердила высокую достоверность полученных результатов, показав, что различия между орошаемыми и богарными полями по урожайности, ET и NDVI являются высокозначимыми ($p < 0,001$). Выявленная корреляция между фактической урожайностью и дистанционными показателями ($r = 0,993$ для NDVI и $r = 0,942$ для ET) доказывает надёжность использования спутникового мониторинга Sentinel-2 и MODIS для оперативного мониторинга состояния кукурузы.

С помощью зональной статистики в QGIS была проанализирована природа вариативности урожая на богаре. Установлено, что низкая продуктивность богарных полей обусловлена их мозаичной структурой. Участки с низким стандартным отклонением NDVI демонстрируют равномерное угнетение посевов, в то время как поля с высокой вариабельностью формируют итоговый сбор зерна за счёт локальных очагов сохранившейся растительности с высокими значениями индекса.

На орошаемых землях выявленная неоднородность NDVI носит технологический характер и вызвана спецификой работы круговых дождевальных машин, что не препятствует достижению стабильно высокой урожайности свыше 75 ц/га.

Таким образом на основе данных наземных наблюдений и ДЗЗ доказано, что реализация генетического потенциала кукурузы в условиях юга России требует обязательного применения орошения.

Литература

1. Зверьков М. С., Смелова С. С., Степанова Т. Г. Прогноз урожайности картофеля по значению индекса NDVI на эродированных землях // Мелиорация и водное хоз-во. 2025. № 2. С. 20–23. DOI: 10.32962/0235-2524-2025-2-20-24.
2. Зейлигер А. М., Ермолаева О. С., Музылев Е. Л. и др. Компьютерный анализ режимов водного стресса орошаемых агроценозов с использованием SWAP-модели, а также данных наземного и космического мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 3. С. 33–43. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-33-43.
3. Ильинская И. Н., Клименко А. И., Батищев И. В. Состояние и оценка мелиорированных земель Ростовской области // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12. № 4. С. 86–103. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-86-103.
4. Музылев Е. Л., Старцева З. П., Успенский А. Б. и др. Использование данных дистанционного зондирования при моделировании водного и теплового режимов сельских территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 108–136. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-108-136.
5. Шуганов В. М., Шогенов А. Х., Кантиев З. Ю., Бижоев Р. В. Оптимизация производства кукурузы путем применения цифровых и умных технологий // Изв. Кабардино-Балкарского науч. центра РАН. 2025. Т. 27. № 5. С. 200–210. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-200-210.
6. Якушев В. П., Якушев В. В., Блохина С. Ю. и др. Перспективы выявления идентификационных показателей состояния посевов по аэрокосмическим снимкам и специализированным полевым исследованиям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 113–127. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-113-127.
7. Adhikary S., Biswas B., Naskar M. K. et al. Remote sensing for agricultural applications // Arid Environmen — Perspectives, Challenges and Management. IntechOpen, 2023. 15 p. DOI: 10.5772/intechopen.106876.
8. Adriko K., Sedona R., Seguni L. et al. From MODIS to Sentinel-2: A regional comparative analysis of crop-yield prediction with matched spatiotemporal data // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2025. V. 18. P. 27663–27683. DOI: 10.1109/jstars.2025.3624046.
9. Allen R. G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study // J. Hydrology. 2000. V. 229. P. 27–41. DOI: 10.1016/S0022-1694(99)00194-8.
10. Kayad A., Sozzi M., Gatto S. et al. Monitoring within-field variability of corn yield using Sentinel-2 and machine learning techniques // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 23. Article 2873. DOI: 10.3390/rs11232873.
11. Kim H. W., Hwang K., Mu Q. et al. Validation of MODIS 16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia // KSCE J. Civil Engineering. 2012. V. 16. No. 2. P. 229–238. DOI: 10.1007/s12205-012-0006-1.
12. Kumar S., Meena R. S., Sheoran S. et al. Remote sensing for agriculture and resource management // Natural Resources Conservation and Advances for Sustainability. 2021. P. 91–135. DOI: 10.1016/B978-0-12-822976-7.00012-0.
13. Pereira L. S., Allen R. G., Smith M., Raes D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future // Agricultural Water Management. 2015. V. 147. P. 4–20. DOI: 10.1016/j.agwat.2014.07.031.
14. Socolini A., Vizzari M. Predictive modelling of maize yield using Sentinel 2 NDVI // Intern. Conf. on Computational Science and Its Applications 2023. Cham: Springer, 2023. P. 327–338. DOI: 10.1007/978-3-031-37114-1_22.
15. Tamás A., Kovács E., Horváth É. et al. Assessment of NDVI dynamics of maize (*Zea mays* L.) and its relation to grain yield in a polyfactorial experiment based on remote sensing // Agriculture. 2023. V. 13. No. 3. Article 689. DOI: 10.3390/agriculture13030689.
16. Van Hoek M., Jia L., Zhou J. et al. Early drought detection by spectral analysis of satellite time series of precipitation and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) // Remote Sensing. 2016. V. 8. No. 5. Article 422. DOI: 10.3390/rs8050422.

Assessment of the effect of irrigation on maize productivity using remote sensing methods

R. V. Kalinichenko¹, A. Yu. Romanovskaya¹, A. E. Bedenko²

¹ V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow 119017, Russia
E-mail: kalinichenko_rv@esoil.ru

² All-Russian Scientific Research Institute of Irrigation and Agricultural Supply Systems
“Raduga”, Kolomna, Moscow Region 140483, Russia
E-mail: timbothdoo@gmail.com

The lack of moisture in the critical phases of maize development in southern Russia makes growing this strategic crop a risky venture. A study conducted at an agricultural enterprise in Krasnodar Krai showed exactly how artificial irrigation transformed the biological productivity of crops in the dry summer of 2025. We combined ground-based field surveys with streaming data from MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) and Sentinel-2 multispectral imagery to verify irrigation efficiency on an area of 1,270 hectares. Statistical data processing confirmed high significance of differences between the groups for all indicators ($p < 0.001$). The results confirmed that natural precipitation (335.6 mm) was not enough to realize the genetic potential of the crop. In bogar areas, total evaporation (evapotranspiration) did not exceed 290 mm, which provoked deep hydrothermal stress. As a result, the yield there ranged from 0.7 to 23.7 c/ha. At the same time, zonal statistics revealed that the survival rate of bogar crops was focal, which was confirmed by the high standard deviation of the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) against the background of low averages. Irrigation radically changed the energy balance of the agrophytocenosis. Additional water allowed raising the level of evapotranspiration to 363–432 mm, ensuring stable photosynthesis. NDVI of irrigation fields reached 0.76–0.80. This resulted in a total yield of 75.3–78.7 c/ha. The integration of remote sensing data and field observations proves that in the current climatic realities of the region, highly productive maize development is impossible without melioration, and high correlation (coefficient $r \geq 0.94$) confirms the accuracy of satellite indicators for crop forecasting.

Keywords: maize, irrigation, evapotranspiration, MODIS, Sentinel-2, water stress, yield

Accepted: 13.05.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-206-214

References

1. Zver'kov M. S., Smelova S. S., Stepanova T. G., Potato yield prediction by NDVI value on eroded lands, *Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo*, 2025, No. 2, pp. 20–23 (in Russian), DOI: 10.32962/0235-2524-2025-2-20-24.
2. Zeyliger A. M., Ermolaeva O. S., Muzylev E. L. et al., Computer analysis of water stress regimes of irrigated agrocoenosis using the SWAP model and ground and space monitoring data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 3, pp. 33–43 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-33-43.
3. Ilyinskaya I. N., Klimenko A. I., Batishchev I. V., Condition and assessment of reclaimed lands in the Rostov region, *Melioratsiya i gidrotekhnika*, 2022, V. 12, No. 4, pp. 86–103 (in Russian), DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-86-103.
4. Muzylev E. L., Startseva Z. P., Uspenskiy A. B. et al., Using remote sensing data to model water and heat regimes of rural territories, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 6, pp. 108–136 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-108-136.
5. Shuganov V. M., Shogenov A. Kh., Kantiev Z. Yu., Bizhiov R. V., Optimization of maize production through the use of digital and smart technologies, *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2025, V. 27, No. 5, pp. 200–210 (in Russian), DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-200-210.
6. Yakushev V. P., Yakushev V. V., Blokhina S. Yu. et al., Prospects for revealing identification indicators of crop canopy based on aerospace imagery and field precision experimentation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 4, pp. 113–127 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-113-127.

7. Adhikary S., Biswas B., Naskar M. K. et al., Remote sensing for agricultural applications, In: *Arid Environment — Perspectives, Challenges and Management*, IntechOpen, 2023, 15 p., DOI: 10.5772/intechopen.106876.
8. Adriko K., Sedona R., Seguini L. et al., From MODIS to Sentinel-2: A regional comparative analysis of crop-yield prediction with matched spatiotemporal data, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2025, V. 18, pp. 27663–27683, DOI: 10.1109/jstars.2025.3624046.
9. Allen R. G., Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study, *J. Hydrology*, 2000, V. 229, pp. 27–41, DOI: 10.1016/S0022-1694(99)00194-8.
10. Kayad A., Sozzi M., Gatto S. et al., Monitoring within-field variability of corn yield using Sentinel-2 and machine learning techniques, *Remote Sensing*, 2019, V. 11, No. 23, Article 2873, DOI: 10.3390/rs11232873.
11. Kim H. W., Hwang K., Mu Q. et al., Validation of MODIS 16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia, *KSCE J. Civil Engineering*, 2012, V. 16, No. 2, pp. 229–238, DOI: 10.1007/s12205-012-0006-1.
12. Kumar S., Meena R. S., Sheoran S. et al., Remote sensing for agriculture and resource management, *Natural Resources Conservation and Advances for Sustainability*, 2021, pp. 91–135, DOI: 10.1016/B978-0-12-822976-7.00012-0.
13. Pereira L. S., Allen R. G., Smith M., Raes D., Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future, *Agricultural Water Management*, 2015, V. 147, pp. 4–20, DOI: 10.1016/j.agwat.2014.07.031.
14. Soccolini A., Vizzari M., Predictive modelling of maize yield using Sentinel 2 NDVI, *Intern. Conf. on Computational Science and Its Applications 2023*, Cham: Springer, 2023, pp. 327–338, DOI: 10.1007/978-3-031-37114-1_22.
15. Tamás A., Kovács E., Horváth É. et al., Assessment of NDVI dynamics of maize (*Zea mays* L.) and its relation to grain yield in a polyfactorial experiment based on remote sensing, *Agriculture*, 2023, V. 13, No. 3, Article 689, DOI: 10.3390/agriculture13030689.
16. Van Hoek M., Jia L., Zhou J. et al., Early drought detection by spectral analysis of satellite time series of precipitation and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), *Remote Sensing*, 2016, V. 8, No. 5, Article 422, DOI: 10.3390/rs8050422.