

**О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНДЕКСА
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ КАРТОФЕЛЯ
(на примере Иркутской области)**

О.И. Пищимко^{1,2}, Л.В. Гарафутдинова³

¹ФГБУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», Новосибирск

²ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет»,
Новосибирск

³ФГБУН Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий
Российской академии наук, Новосибирск

Исследовательская работа проведена с целью определить возможности использования дистанционного зондирования для прогнозирования урожайности картофеля по всем категориям хозяйств на территории Иркутской области, что в настоящее время является актуальным и ценным для сельхозтоваропроизводителей ввиду развития цифровых технологий. Ценность исследования заключается в разработке моделей расчета, созданных на основе данных наземной сети станций, и добавления в них индекса дистанционного зондирования зеленой площади листьев LAI. Авторами проведен анализ данных, полученных с наземной сети станций, и многолетнего ряда урожайности картофеля по всем категориям хозяйств. Для включения в модели использован индекс дистанционного зондирования зеленой площади листьев, определяемый по многозональным космическим изображениям. Для расчета индекса LAI получены данные с космического спутника Landsat-8. При расчете физико-статистических моделей взят многолетний ряд урожайности картофеля по всем категориям хозяйств. В модели включены основные лимитирующие урожайность факторы, а также комплексные показатели в сочетании с данными дистанционного зондирования Земли, были получены новые экспериментальные модели с достаточно высокой оправдываемостью. Полученные модели позволят, основываясь на агрометеорологических условиях, фактическом состоянии растений и спутниковых данных, осуществлять заблаговременный прогноз урожайности картофеля по всем категориям хозяйств в принятые в Росгидромете сроки.

Ключевые слова: агрометеорологические наблюдения, модель прогноза урожайности, LAI, картофель, Иркутская область.

USE OF REMOTE SENSING TO FORECAST POTATO YIELD (on the example of the Irkutsk region)

O.I. Pishchimko^{1,2}, L.V. Garafutdinova³

¹*Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk*

²*Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk*

³*Siberian Federal Scientific Centre of AgroBioTechnologies
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk*

The research work was carried out in order to determine the possibility of using remote sensing to predict the yield of potatoes for all categories of farms in the Irkutsk region, which is currently relevant and valuable for agricultural producers in view of the development of digital technologies. The value of the study lies in the development of calculation models based on the data of the ground network of stations and the addition of the remote sensing leaf green area index (LAI) to them. The authors analyzed the data obtained from the ground network of stations and the long-term series of potato yields for all categories of farms. For inclusion in the model, the remote sensing index of the green area of leaves, determined from multi-zone satellite images, was used. To calculate the LAI, data were obtained from the Landsat-8 space satellite. When calculating physical and statistical models, a long-term series of potato yields for all categories of farms was taken. The models include the main yield-limiting factors, as well as complex indicators in combination with Earth remote sensing data; new experimental models were obtained with a fairly high justification. The resulting models will allow, based on agrometeorological conditions, the actual state of plants and satellite data, to issue an early forecast of potato yields for all categories of farms within the time limits adopted by Roshydromet.

Key words: *agrometeorological observations, yield forecast model, LAI, potato, Irkutsk region.*

Моделирование урожайности сельскохозяйственных культур оказывает влияние на отрасль сельского хозяйства, которая является стратегической для Российской Федерации. Своевременный, качественный, учитывающий интенсификацию отрасли агрометеорологический прогноз урожайности сельскохозяйственных культур способен оказать влияние на производственный процесс и принятие экономических решений, от которых зависит продовольственная безопасность исследуемой территории.

Климат на территории Иркутской области умеренный, резко континентальный, обусловлен географическим положением. Зимний период затяжной, отличается сухостью и значительными понижениями температур. Изменчивость погодных условий приводит к существенным колебаниям урожайности сельскохозяйственных культур по годам. Ценным продовольственным растением, возделываемым на территории исследуемой

области, является картофель (*Solanum tuberosum* L.), который относится к семейству пасленовых (*Solanaceae*). Картофель используется в пищевой промышленности и кормопроизводстве. Для прогнозирования урожайности картофеля в агрометеорологической практике применяют данные с сети наземных станций [1–3]. Ранее одним из авторов были разработаны методы прогноза урожайности картофеля, которые успешно прошли оперативные испытания. Решением технического совета ФГБУ «Иркутское УГМС» от 20 апреля 2023 г., одобренным решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и геологическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 29 мая 2023 г., автоматизированный метод прогноза урожайности картофеля по сельхозпредприятиям и по всем категориям хозяйств Иркутской области (ФГБУ «СибНИГМИ», О.И. Пищимко) с 1 августа 2023 г. внедрен в качестве основного расчетного метода. В продолжение исследования в сотрудничестве со СФНЦА РАН были разработаны экспериментальные модели с включением спутниковой информации. Ведь все чаще в работах авторов при прогнозе урожайности используют индексы дистанционного зондирования, которые, по их мнению, имеют значимую связь с многолетней динамикой урожайности [4–6]. Использование дистанционного зондирования в сельскохозяйственном секторе существенно расширило возможности мониторинга роста сельскохозяйственных культур и оценки характеристик параметров растительности, таких как индекс листовой поверхности (LAI) [7]. Также данные, полученные при помощи дистанционного зондирования, позволяют четко понимать состояние роста культур, что в дальнейшем дает возможность принимать решения по стратегическому управлению сельскохозяйственными полями и, таким образом, устойчиво повышать урожайность. В этой работе использован LAI, на основе которого проводят мониторинг состояния культур и прогнозируют урожайность. LAI выступает как один из определяющих жизненный цикл и структуру растительного покрова параметр, связанный с фотосинтезом, дыханием и транспирацией [8].

Цель данного исследования состоит в определении возможности использования дистанционного зондирования для прогнозирования урожайности картофеля по всем категориям хозяйств на территории Иркутской области.

Методика

На начальном этапе происходит анализ территории, условий роста и формирования урожая. Определяются главные факторы климата, среда обитания растений и культура земледелия исследуемого региона. Затем составляется предварительный список лимитирующих факторов, из которых формируются базы данных. При помощи баз данных рассчитываются

корреляционные матрицы, отражающие зависимость факторов между собой и урожайностью сельскохозяйственных культур.

При анализе матриц необходимо принимать во внимание следующее:

1) они должны быть значимы с учетом объема выборки и точности измерения;

2) они должны быть, по возможности, слабо коррелированы между собой или вовсе независимы.

Для создания физико-статистических моделей в исследовании использовались данные наземной сети станций за период с 1981 по 2016 г. Данные наземной сети станций предоставлены отделом агрометеорологических прогнозов и агрометеорологии ФГБУ «Иркутское УГМС», выборка проведена из агрометеорологических ежегодников. Выделены 20 репрезентативно расположенных станций, наиболее полно отражающих агрометеорологические условия исследуемой области. Проанализированы показатели температуры, осадков, дефицита насыщения воздуха. Проведен расчет и анализ комплексных величин [9]. Отобраны факторы, оказывающие наиболее значимое влияние на процесс формирования урожайности картофеля по всем категориям хозяйств Иркутской области. Расчеты LAI были сделаны в лаборатории агроклиматических исследований СФНЦА РАН. Проведен расчет значений LAI, полученного посредством обработки снимков дистанционного зондирования Земли со спутникового аппарата Landsat-8. Космические снимки скачаны с сайта Геологической службы США (<https://earthexplorer.usgs.gov>), снимки находятся в свободном доступе. Границы рабочих участков для расчета LAI определяли при помощи разработанной методики распознавания сельскохозяйственных культур на основе дешифрирования [10].

Расчет индекса произведен при помощи формулы:

$$LAI = ((1 + NDVI)/(1 - NDVI) * NDVI)^{0,5},$$

где NDVI – нормализованный вегетационный индекс, рассчитанный по формуле

$$NDVI = ((NIR - Red)/(NIR + Red)),$$

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра, RED – отражение в красной области спектра.

Как показал анализ, наибольшее влияние на формирование урожайности картофеля на рассматриваемой территории оказывают условия тепло- и влагообеспеченности.

Большую информативность имеют комплексные показатели, которые отражают как термический режим, так и условия увлажнения. В качестве основного агрометеорологического фактора, определяющего условия вегетации и формирования урожая, был использован гидротермический

коэффициент Г.Т. Селянинова с апреля по 20 июля. При сопоставлении этого фактора с урожайностью оказалось, что в основном неблагоприятные агрометеорологические условия, резко снижающие урожайность картофеля, складывались при низких значениях ГТК, т. е. при возникновении засушливых явлений.

Результаты

Проведен анализ динамики многолетнего ряда урожайности. Урожайность картофеля по всем категориям хозяйств Иркутской области имеет среднюю степень рассеивания данных согласно значению коэффициента вариации (табл. 1). Минимальное значение урожайности было отмечено в 1988 г. и составило 82 ц/га, максимальное – в 1994 г. и составило 186 ц/га.

Для прогноза были построены две экспериментальные модели множественной линейной регрессии (табл. 2). Выбор вошедших в модели параметров и интервала их временного суммирования определялся по фазе вегетации культуры. Для поиска предикторов, вошедших в модели, был использован метод наименьших квадратов. Многофакторные модели,

Таблица 1

Характеристики урожайности картофеля по всем категориям хозяйств на территории Иркутской области (1981–2021)

Характеристика	Значение
Средняя урожайность, ц/га	138,1
Максимум урожайность, ц/га	186,00 (1994 г.)
Минимум урожайность, ц/га	82,00 (1988 г.)
Коэффициент вариации (%)	13
Стандартное отклонение	18,50

Таблица 2

Модели прогноза урожайности картофеля по всем категориям хозяйств Иркутской области с применением индекс листовой поверхности (LAI)

№ модели	Вид модели	Коэффициент детерминации (R)
1	$y = 136,398 + -0,626 \text{ ГТК(IV} - 20.\text{VII)} + -5,171 \text{ LAI(VII)} + 1,060 n$	0,62
2	$y = 119,924 + 2,155D (V - 20.\text{VII}) + -5,840 \text{ LAI(VII)} + 1,017 n$	0,66

y – урожайность, ц/га; $D (V - 20.\text{VII})$ – среднесуточный дефицит насыщения воздуха за периоды, гПа; ГТК (IV – 20.VII) – гидротермический коэффициент Селянинова:

$$\text{ГТК(IV} - 20.\text{VII)} = \frac{OC(\text{IV} - 20.\text{VII})}{0,1 \sum_T (\text{IV} - 20.\text{VII})}; \quad n - \text{порядковый номер года.}$$

полученные в результате объединения данных наземной сети и значений индекса дистанционного зондирования LAI, при авторской проверке показали достаточно хорошую оправдываемость.

Оценка успешности методов прогноза урожайности картофеля по всем категориям хозяйств Иркутской области проводилась согласно «Методическим указаниям по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов» РД 52.27.284-91 [11].

Заключение о качестве метода давалось на основании материалов шестилетней независимой выборки с использованием двух критериев оправдываемости метода и его ошибки.

Модели расчета урожайности картофеля по всем категориям хозяйств соответствуют общепринятому в Росгидромете сроку составления прогноза 1–2 августа. Результаты авторской проверки за период с 2017 по 2021 г., изложенные в табл. 3, показывают в большинстве случаев преимущество новых моделей и достаточно высокую оправдываемость.

Средняя величина относительной ошибки методических прогнозов урожайности картофеля по всем категориям хозяйств с использованием индекса LAI с 2017 по 2019 г. составила по модели 1 – 1,7 %, по модели 2 – 1,8 %, в 2020 г. по модели 1 – 3,6 %, по модели 2 – 3,8 %, в 2021 г. по модели 1 – 2,8 % и по модели 2 – 1,8 %. Средняя относительная ошибка методического прогноза в период 2017–2019 гг. составили 3 %, в 2020 г. – 5 %, в 2021 г. – 2 %. Таким образом, использование спутникового индекса в период с 2017 по 2020 г. позволило улучшить оправдываемость прогноза.

Таблица 3

**Средняя оправдываемость прогноза урожайности картофеля по всем категориям хозяйств Иркутской области за 2017–2021 гг. (по величине относительной ошибки).
Дата составления прогноза 1–2 августа**

№ модели	Допустимая погрешность	Методический с использованием LAI	Методический
2017–2019			
1	4,6	98	97
2	4,6	99	97
2020			
1	4,5	96	95
2	4,5	96	95
2021			
1	4,6	97	98
2	4,6	98	98

По величине допустимой погрешности прогнозы экспериментальных моделей оправдались на 100 %. Методический прогноз по величине допустимой погрешности не оправдался в 2020 г.

Заключение

Включение в состав предикторов спутниковой информации позволяет скорректировать начальные условия на момент составления прогноза, снимает необходимость дополнительно учитывать особенности агротехники, также способствует повышению достоверности и точности прогноза.

Таким образом, основываясь на проведенном исследовании, были получены экспериментальные модели прогнозирования урожайности картофеля с использованием дистанционного зондирования (индекс листовой поверхности LAI). Использование LAI в сочетании с многолетним рядом данных урожайности и агрометеорологическими данными наземной сети станций Росгидромета позволяет получить модели прогноза урожайности картофеля по всем категориям хозяйств с достаточно высокой оправданностью.

Литература

1. Пищимко О.И., Гарафутдинова Л.В. Прогнозирование урожайности картофеля // Вестн. Бурят. государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2022. № 4 (69). С. 15–22. DOI 10.34655/bgsha.2022.69.4.002. EDN HBAVCT.
2. Старостина Т.В. Результаты испытания методов прогноза урожайности картофеля, многолетних и однолетних трав по Омской области / Т.В. Старостина, С.М. Кононенко, Т.Ю. Гусарова // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2019. № 46. С. 56–59. EDN ASPATX.
3. Результаты авторских и производственных испытаний в ФГБУ «Гидрометцентр России» автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности яровой пшеницы и картофеля по субъектам Российской Федерации / Т.А. Гончарова, Т.А. Найдина, В.М. Лебедева, Н.А. Богомолова // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2014. № 41. С. 111–126. EDN SZWIXD.
4. Бондур В.Г., Гороховский К.Ю., Игнатьев В.Ю. и др. Метод прогнозирования урожайности по космическим наблюдениям за динамикой развития вегетации // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 6. С. 61–68. EDN UIYCWN.
5. Li D., Miao Y., Gupta S.K. et al. Improving potato yield prediction by combining cultivar information and UAV remote sensing data using machine learning // Remote Sens. 2021. Vol. 13, No. 16. P. 3322. DOI: 10.3390/rs13163322.

6. *Bala S.K., Islam A.S.* Correlation between potato yield and MODIS-derived vegetation indices // *Int. J. Remote Sens.* 2009. Vol. 30, No. 10. P. 2491–2507. DOI: 10.1080/01431160802552744.
7. *Newton I.H., Tariqul Islam A.F.M., Saifil Islam A.K.M. et al.* Yield prediction model for potato using Landsat time series images driven vegetation indices // *Remote Sens Earth Syst Sci.* 2018. Vol. 1. P. 29–38. DOI: 10.1007/s41976-018-0006-0.
8. *Luo S., He Y., Li Q. et al.* Nondestructive estimation of potato yield using relative variables derived from multi-period LAI and hyperspectral data based on weighted growth stage // *Plant Methods.* 2020. Vol. 16. Article No. 150. DOI: 10.1186/s13007-020-00693-3.
9. *Пищимко О.И., Гарафутдинова Л.В.* Связь урожайности картофеля с гидротермическим коэффициентом и дистанционным зондированием (на примере Иркутской области) // *Теория и практика современной аграрной науки: Сборник VI национальной (всероссийской) научной конференции с международным участием (Новосибирск, 27 февраля 2023 г.).* Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2023. С. 164–167. EDN EIZOBO.
10. *Гарафутдинова Л.В.* Оценка методов классификации многозональных космических снимков // *Вестник Омского государственного аграрного университета.* 2022. № 4 (48). С. 19–28. DOI: 10.48136/2222-0364_2022_4_19. EDN MWSBYQ.
11. РД 52.27.284-91: Методические указания по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. М.: Гидрометеиздат, 1991. С. 98–107.