

Оценка урожайности сои на Дальнем Востоке с использованием регрессионных моделей по данным дистанционного зондирования Земли

А. С. Степанов¹, С. В. Макогонов^{1,2}, В. А. Толпин³

¹ *Дальневосточный НИИ сельского хозяйства
Хабаровский край, п. Восточный-1, 680521, Россия
E-mail: stepanxx@mail.ru*

² *Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, 680000, Россия
E-mail: smakogonov@gmail.com*

³ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: tolpin@d902.iki.rssi.ru*

Соя является основной возделываемой культурой в структуре сельского хозяйства дальневосточных регионов России. С практической точки зрения в рамках реализации государственной стратегии развития агропромышленного комплекса особую важность представляет вопрос прогнозирования урожайности культур, в том числе и сои, получившей широкое распространение в субъектах Дальневосточного федерального округа (ДФО). В рамках выполненной работы были построены регрессионные модели оценки урожайности сои, проведена оценка их точности и рассчитаны ошибки прогноза. В исследовании использовались данные о посевных площадях и валовом сборе сои на региональном уровне в период с 2007 по 2018 г. Показатели, вошедшие в регрессионную модель, отражали как спутниковую, так и метеоинформацию для этих регионов. Для моделирования в каждом субъекте федерации были выбраны основные районы культивирования сои. В качестве независимых переменных было предложено использовать максимальное значение NDVI среди 7-дневных композитов индекса за календарный год, вычисленных по маске пахотных земель, а также рассчитанные по метеоданным интегральные показатели: гидротермический коэффициент и индекс биологической эффективности климата. Проведённый анализ оценки точности полученных моделей показал, что наиболее высокую точность продемонстрировала регрессионная модель, построенная для предварительно очищенного от влияния долговременной тенденции временного ряда: средняя ошибка модели составила для Амурской обл. $8,1 \pm 2,4$ %, Приморского края — $9,5 \pm 3,9$ %, Хабаровского края — $8,3 \pm 2,6$ %, Еврейской автономной области — $10,2 \pm 3,1$ %. На практике для решения задачи прогнозирования урожайности текущего года удобнее применять регрессионную модель, где в качестве одной из зависимых переменных используется максимальное значение индекса NDVI. Построенный прогноз урожайности сои на 2018 г. по данным 2007–2017 гг. показал, что ошибка прогноза в сравнении с фактическим показателем находится в пределах $2,1–7,3$ % для разных субъектов ДФО. В целом предложенные модели с заявленным уровнем точности могут быть использованы для прогнозирования урожайности сои, а также для принятия управленческих решений как региональными министерствами, так и отдельными агропромышленными предприятиями.

Ключевые слова: соя, урожайность, Дальний Восток, сельское хозяйство, регрессионная модель, дистанционное зондирование, NDVI

Одобрена к печати: 06.09.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-194-198

Соя относится к одной из ключевых культур мирового сельского хозяйства. В последнее время в России развитию производства и переработки сои уделяется повышенное внимание. Основной акцент направлен на разработку новых, высокопродуктивных сортов, повышение урожайности и увеличение посевных площадей культуры в приоритетных регионах (Зайцев и др., 2016). В 2018 г. более 50 % посевных площадей сои на территории РФ приходилось на долю четырёх субъектов Дальневосточного федерального округа (ДФО): Амурской обл., Приморского и Хабаровского краёв, а также Еврейской автономной области (ЕАО). При этом, по данным Росстата, соя является ведущей культурой в структуре сельскохозяйственного производства этих регионов. Так, например, в Амурской обл. и Хабаровском крае посевная

площадь сои составляет более 30 % общей площади сельхозугодий, а в ЕАО — более 70 % (Регионы..., 2018). При этом вариабельность динамического временного ряда урожайности культуры в пределах одного региона может достигать достаточно высоких значений (Асеева, Терехова, 2016). В условиях долгосрочного планирования развития отраслей агропромышленного комплекса вопросы прогнозирования урожайности культур приобретают особенно большое значение. В рамках настоящей работы авторами были построены регрессионные модели оценки урожайности сои на примере отдельных регионов Дальнего Востока, проведена оценка их точности и рассчитаны ошибки прогноза.

Проведение исследований стало возможным благодаря наличию подробной статистической информации, а также данных по индексам NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс), полученных на основе результатов обработки спутниковых данных. Вегетационные индексы NDVI и метеорологические данные по районам исследуемых регионов были получены с использованием информационной системы «Вега-Science» (Куссуль и др., 2012; Страшная и др., 2015; Толпин и др., 2014).

Для построения модели были использованы данные о посевных площадях и валовом сборе сои в четырёх субъектах ДФО в период с 2007 по 2018 г. В качестве зависимой переменной регрессионной модели рассматривалась средняя урожайность (ц/га) культуры в регионе, которая рассчитывалась как отношение валового сбора к общей посевной площади. В каждом субъекте РФ по данным региональных Минсельхозов были определены основные районы культивирования сои в рассматриваемый временной период: Тамбовский р-н (Амурская обл.), Ленинский р-н (ЕАО), Хорольский р-н (Приморский край), р-н им. Лазо (Хабаровский край). Для выбранных территорий в качестве независимых переменных модели использовались максимальные значения NDVI среди 7-дневных композитов индекса за календарный год, вычисленных по маске пахотных земель, а также рассчитанные по метеоданным интегральные показатели: гидротермический коэффициент (ГТК) и индекс биологической эффективности климата (БЭК), характеризующие соответственно степень увлажнения/засушливости вегетационного периода и общий годовой экологический фон (Переведенцев и др., 2012). Наиболее высокую точность продемонстрировала регрессионная модель 1, построенная для отклонений значений выравненного ряда от фактической урожайности. В качестве расчётного периода для модели были выбраны 2007–2017 гг. В табл. 1 представлены уравнения регрессии для Амурской обл., смоделированные значения урожайности в период 2007–2017 гг., а также прогнозные значения на 2018 г.

Таблица 1. Урожайность сои (фактическая и смоделированная) в Амурской обл. в период с 2007 по 2018 г.

Год	Урожайность, ц/га	NDVI (макс.)	ГТК	БЭК	Урожайность, ц/га (модель 1)	Урожайность, ц/га (модель 2)
2007	7,8	0,736	0,81	14,4	9,5	9,3
2008	8,5	0,715	0,58	12,9	10,1	8,4
2009	10,3	0,779	1,75	26,2	9,9	11,2
2010	11,1	0,811	1,14	19,1	9,2	12,6
2011	10,8	0,808	1,01	15,9	9,4	12,4
2012	10,6	0,792	1,10	22,9	10,8	11,7
2013	12,2	0,783	1,20	23,0	11,4	11,3
2014	13,0	0,773	1,38	19,4	11,5	10,9
2015	11,3	0,750	0,95	17,3	12,4	9,9
2016	10,3	0,782	1,78	26,9	12,6	11,3
2017	13,1	0,815	1,48	24,3	12,2	12,7
2018	12,6	0,826	1,90	26,6	12,3	13,2
Ошибка модели, %, $x_{cp} \pm \Delta x_{cp}$					8,1±2,4	10,5±3,7

Модель 1: $y_j = y_j^* + 15,85 + 22,15 NDVI_j - 0,54 ГТК_j + 0,1 БЭК_j$; модель 2: $y_j = -22,29 + 42,96 NDVI_j$.

На практике для прогнозирования урожайности текущего года может быть применена регрессионная модель 2, где в качестве независимого предиктора используется максимальное значение NDVI текущего года. Как видно из *табл. 1*, ошибка модели 2 для Амурской обл., рассчитанная за период 2007–2017 гг., составила $10,5 \pm 3,7$ %, в то время как соответствующая характеристика модели 1 — $8,1 \pm 2,4$ %.

Как следует из *табл. 2*, средняя ошибка модели 1 по данным за 2007–2017 гг. в других регионах ДФО составила соответственно $9,5 \pm 3,9$ % для Приморского края, $8,3 \pm 2,6$ % для Хабаровского края и $10,2 \pm 3,1$ % для ЕАО. Сравнение прогнозируемых значений урожайности 2018 г. с фактическими показателями продемонстрировало, что ошибка прогноза с использованием модели 1 в 2018 г. находилась в диапазоне от 2,2 до 4,9 %. Применение модели 2 увеличило максимальную ошибку прогнозирования до 7,3 %.

Таблица 2. Оценка точности регрессионных моделей для расчёта урожайности сои в разных субъектах ДФО в период с 2007 по 2018 г.

Регион	Ошибка модели, %, $x_{cp} \pm \Delta x_{cp}$		Урожайность, ц/га (2018 г., фактическая)	Предсказанная урожайность, ц/га (2018 г.)		Ошибка прогноза, %	
	Модель 1	Модель 2		Модель 1	Модель 2	Модель 1	Модель 2
Амурская обл.	$8,1 \pm 2,4$	$10,5 \pm 3,7$	12,3	12,6	13,2	2,4	7,3
Приморский край	$9,5 \pm 3,9$	$9,7 \pm 4,2$	13,4	13,7	12,9	2,2	3,7
Хабаровский край	$8,3 \pm 2,6$	$9,9 \pm 2,9$	14,4	13,7	14,1	4,9	2,1
ЕАО	$9,2 \pm 3,1$	$10,2 \pm 3,1$	10,4	10,1	10,9	2,9	4,8

В целом полученная точность разработанных моделей и величина ошибки прогноза являются вполне достаточными для решения практических задач регионального производства сои. Предложенные модели могут применяться для прогнозирования урожайности и принятия управленческих решений региональными министерствами, районными департаментами сельского хозяйства, а также отдельными агропромышленными предприятиями. Дальнейшее улучшение точности и глубины прогнозирования возможно при моделировании регрессионной зависимости урожайности отдельных полей от индекса NDVI, вычисленного по маске зернобобовых культур, а также с учётом возможного влияния агротехнических факторов.

В исследовании использовались результаты обработки спутниковых данных, полученные посредством информационной системы «Вега-Science» (Толпин и др., 2014), а также ресурсы Центров коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015) и «Центр данных ВЦ ДВО РАН» (Sorokin et al., 2017).

Литература

1. Асеева Т. А., Терехова М. В. Рациональные приёмы использования сельскохозяйственных земель в Хабаровском крае при возделывании сои // *Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса*. 2016. № 1. С. 168–171.
2. Зайцев Н. И., Бочкарев Н. И., Зеленцов С. В. Перспективы и направления селекции сои в России в условиях реализации национальной стратегии импортозамещения // *Масличные культуры*. Научно-техн. бюл. ВНИИМК. 2016. № 2(166). С. 3–11.
3. Кукуль 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.
4. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 5. С. 247–267.

5. *Переведенцев Ю. П., Шарипова Р. Б., Важнова Н. А.* Агроклиматические ресурсы Ульяновской области и их влияние на урожайность зерновых культур // Вестн. Удмуртского ун-та. Сер.: Биология. Науки о земле. 2012. № 2. С. 120–126.
6. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2018: статист. сб. М.: Росстат, 2018. 1162 с.
7. *Страшина А. И., Тарасова Л. Л., Богомолова Н. А., Максименкова Т. А., Береза О. В.* Прогнозирование урожайности зерновых и зернобобовых культур в центральных черноземных областях на основе комплексирования наземных и спутниковых данных // Тр. Гидрометеоролог. научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2015. № 353. С. 128–153.
8. *Толпин В. А., Луян 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.
9. *Sorokin A. A., Makogonov S. I., Korolev S. P.* The Information Infrastructure for Collective Scientific Work in the Far East of Russia // Scientific and Technical Information Processing. 2017. V. 4. P. 302–304.

Assessment of soybean yield in the Far East using regression models based on remote sensing data

A. S. Stepanov¹, S. V. Makogonov^{1,2}, V. A. Tolpin³

¹ *Far East Research Institute of Agriculture
Vostochny-1, Khabarovsk Territory 680521, Russia
E-mail: stepanxx@mail.ru*

² *Computing Center FEB RAS, Khabarovsk 680000, Russia
E-mail: smakogonov@gmail.com*

³ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: tolpin@d902.iki.rssi.ru*

Soybean is the main cultivated crop in the structure of agriculture in the Far Eastern regions of Russia. From a practical point of view, within the framework of the implementation of the state strategy for the development of the agro-industrial complex, the issue of forecasting crop yields, including soybeans, which is widely spread in the regions of the Far Eastern Federal District (FEFD), is of particular importance. As part of the work performed, regression models for estimating the yield of soybean were constructed, their accuracy was assessed and forecast deviations calculated. The study used data on acreage and gross soybean harvest at the regional level in the period from 2007 to 2018. The indicators included in the regression model reflected both satellite and meteorological information for these regions. The major soybean cultivation areas were selected for modeling in each subject of the Russian Federation. As independent variables, it was proposed to use the maximum NDVI value among the 7-day composites of the NDVI index for the calendar year, calculated using a mask of arable land, as well as integrated indicators calculated using meteorological data: hydrothermal coefficient and climate biological efficiency index. The analysis performed to assess the accuracy of the models showed that the regression model was the most accurate for the time series that was previously cleared of the influence of the long-term trend: the average model deviation for the Amur Region was 8.1 ± 2.4 %, Primorsky Krai — 9.5 ± 3.9 %, Khabarovsk Krai — 8.3 ± 2.6 %, Jewish Autonomous Oblast — 10.2 ± 3.1 %. In practice, to solve the problem of forecasting the yield of the current year, it is more convenient to apply the regression model, where the maximum value of the NDVI index is used as one of the dependent variables. The soybean yield forecast for 2018 according to 2007–2017 data showed a deviation from the actual yield in the range of 2.1–7.3 % for different subjects of FEFD. In general, the proposed models with the stated level of accuracy can be used to predict the yield of soybeans, as well as to make management decisions both at the level of regional ministries and individual agro-industrial enterprises.

Keywords: soybean, yield, Far East, agriculture, regression model, remote sensing, NDVI

Accepted: 06.09.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-194-198

References

1. Aseeva T.A., Terekhova M.V., Ratsional'nye priemy ispol'zovaniya sel'skokhozyaistvennykh zemel' v Khabarovskom krae pri vzdelyvanii soi (Rational use of agricultural land in the Khabarovsk region in the cultivation of soybeans), *Dal'nii Vostok: problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa*, 2016, No. 1, pp. 168–171.
2. Zaitsev N.I., Bochkarev N.I., Zelentsov S.V., Perspektivy i napravleniya selektsii soi v Rossii v usloviyakh realizatsii natsional'noi strategii importozameshcheniya (Prospects and directions of soybean breeding in Russia in the context of the implementation of the national strategy of import substitution), *Maslichnye kul'tury. Nauchno-tehnicheskii byulleten' VNIIMK* (Scientific and Technical Bulletin VNIIMK), 2016, No. 2(166), pp. 3–11.
3. Kussul N.N., Kravchenko A.N., Skakun S.V., Adamenko T.I., Shelestov A.Yu., Kolotii A.V., Gri-pich Yu.A., Regressionnye modeli otsenki urozhainosti sel'skokhozyaistvennykh kul'tur po dannym MODIS (Crop Yield Forecasting Regression Models based on MODIS Data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 95–107.
4. Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Kashnitskii A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovyykh dannyykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (The center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data of the IKI RAS for solving problems of studying and monitoring the environment), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 247–267.
5. Perevedentsev Yu.P., Sharipova R.B., Vazhnova N.A., Agroklimaticheskie resursy Ul'yanovskoi oblasti i ikh vliyanie na urozhainost' zernovykh kul'tur (Agroclimatic resources of the Ulyanovsk region and their impact on the yield of grain crops), *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Ser.: Biologiya. Nauki o zemle*, 2012, No. 2, pp. 120–126.
6. *Regiony Rossii. Sotsial'no-ekonomicheskie pokazateli. 2018* (Regions of Russia. Socio-economic indicators. 2018), Moscow: Rosstat, 2018, 1162 p.
7. Strashnaya A.I., Tarasova L.L., Bogomolova N.A., Maksimenkova T.A., Bereza O.V., Prognozirovaniye urozhainosti zernovykh i zernobobovykh kul'tur v tsentral'nykh chernozemnykh oblastiakh na os-nove kompleksirovaniya nazemnykh i sputnikovyykh dannyykh (Predicting the yield of grain and legumi-nous crops in the central black earth regions based on the integration of ground-based and satellite data), *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiiskoi Federatsii*, 2015, No. 353, pp. 128–153.
8. Tolpin V.A., Loupian E.A., Bartalev S.A., Plotnikov D.E., Matveev A.M., Vozmozhnosti analiza sostoya-niya sel'skokhozyaistvennoi rastitel'nosti s ispol'zovaniem sputnikovogo servisa "VEGA" (Opportunities for analyzing the state of agricultural vegetation using the VEGA satellite service), *Optika atmosfery i okeana*, 2014, Vol. 27, No. 7(306), pp. 581–586.
9. Sorokin A.A., Makogonov S.I., Korolev S.P., The Information Infrastructure for Collective Scientific Work in the Far East of Russia, *Scientific and Technical Information Processing*, 2017, Vol. 44, No. 4, pp. 302–304.