

Влияние климатических характеристик и значений вегетационного индекса NDVI на урожайность сои (на примере районов Приморского края)

А. С. Степанов¹✉, Т. А. Асеева¹, К. Н. Дубровин²

¹ Дальневосточный НИИ сельского хозяйства, Восточное, Россия

² Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия

✉ E-mail: stepanxx@mail.ru

Аннотация. Актуальность исследования. Соя является одной из ключевых культур мирового сельского хозяйства; в последнее время производство сои активно развивается на территории российского Дальнего Востока. Для решения практических задач, связанных с производством сои, в том числе планирования посевных площадей и экспортных операций субъектами ДФО, необходимо с достаточной точностью прогнозировать урожайность сельскохозяйственной культуры. **Цель исследования** – определить факторы, влияющие на урожайность культуры, установить взаимосвязь между этими показателями и урожайностью, а также оценить точность предложенной модели. **Методы исследования.** На примере Ханкайского, Хорольского, Михайловского и Октябрьского районов Приморского края рассмотрены показатели, характеризующие климатические особенности муниципальных образований, а также данные дистанционного зондирования Земли за период 2008–2018 гг. Метеорологические характеристики территорий и значения индексов вегетации получены с использованием системы «VEGA-Science», дополнительно рассчитаны интегральные коэффициенты, при этом взаимно коррелирующие показатели исключены из регрессионной модели. **Основным результатом исследования** является многофакторная регрессионная модель, где в качестве зависимой переменной выступает среднегодовая урожайность сои, а независимых переменных – максимум среди еженедельных композитов вегетационного индекса NDVI пахотных земель, гидротермический коэффициент, продолжительность вегетационного периода, средняя годовая влажность и сумма температур верхнего слоя почвы. Средняя абсолютная ошибка модели составляет: для Ханкайского района 11,0 %, Хорольского района – 4,8 %, Октябрьского района – 9,5 %, Михайловского района – 8,9 %. **Научная новизна и практическая значимость.** Для прогнозирования урожайности сои на Дальнем Востоке разработана регрессионная модель, предполагающая использование климатических характеристик и значений NDVI пахотных полей по муниципальному образованию. В целом предложенные модели с заявленным уровнем точности могут быть использованы для прогнозирования урожайности сои, а также для принятия управленческих решений на региональном и муниципальном уровнях.

Ключевые слова: соя, урожайность, Приморский край, климатические характеристики, регрессионная модель, дистанционное зондирование, NDVI.

Для цитирования: Степанов А. С., Асеева Т. А., Дубровин К. Н. Влияние климатических характеристик и значений вегетационного индекса NDVI на урожайность сои (на примере районов Приморского края) // Аграрный вестник Урала. 2020. № 01 (192). С. 10–19. DOI: 10.32417/1997-4868-2020-192-1-10-19.

Дата поступления статьи: 22.11.2019.

Постановка проблемы (Introduction)

В настоящее время соя является одной из ключевых сельскохозяйственных культур в мировом агропромышленном комплексе [1, с. 40; 2, с.78]. За последние 10 лет мировое потребление сои выросло приблизительно в 1,6 раза, при этом валовой сбор культуры в РФ увеличился более чем в 5 раз (с 0,7 до 3,6 млн тонн в 2008–2018 гг.). На территории Дальневосточного федерального округа (ДФО) соя является основной возделываемой культурой, на долю четырех южных регионов ДФО в 2018 г. приходилось более 50 % общей площади посевов сои в России

[3, с. 168; 4]. В соответствии со стратегией социально-экономического развития Дальнего Востока и Байкальского региона до 2025 г. планируется повысить в том числе роль экспортной составляющей в производстве сои, для чего необходимо решить задачу планирования необходимых посевных площадей с использованием современных методов прогнозирования урожайности культуры [5, с. 9; 6, с. 4290].

В последнее время для прогнозирования урожайности культур на районном или региональном уровне наряду с традиционными трендовыми методами и методами года-

аналога применяются регрессионные модели, где в качестве независимых переменных используются показатели, характеризующие климат, а также данные, полученные с помощью методов дистанционного зондирования Земли из космоса [7, с. 70; 8, с. 18; 9, с. 198; 10, с. 176; 11, с. 15]. Основными показателями, отражающими состояние растительности пахотных земель в определенный момент времени, являются рассчитанные по спутниковым снимкам значения вегетационных индексов [12, с. 65; 13, с. 174; 14, с. 67]. В то же время совокупность метеорологических факторов, включающая в себя как отдельные показатели, например температуру и влажность, так и интегральные характеристики климата, определяет условия производства и продуктивности сельскохозяйственных культур муниципального образования [15, с. 55; 16, с. 534]. Различия в значениях климатических показателей соседних муниципалитетов особенно характерны для дальневосточных регионов в связи со значительной площадью субъектов федерации и их структурных единиц. На особенности формирования микроклимата оказывают влияние сложный рельеф региона и специфика муссонного климата, что в первую очередь отражается на пахотных землях Приморского и Хабаровского краев [17, с. 1774].

Актуальность поиска оптимальной регрессионной модели для оценки урожайности сои в Приморье обусловлена тем, что соя является основным объектом культивирования практически во всех земледельческих районах территории. При этом Приморский край занимает второе место в РФ по общей площади посевов сои – в 2018 г

доля посевной площади сои составила практически 11 % от общероссийского значения. Также Приморский край характеризуется наиболее высоким ростом как валового сбора, так и посевных площадей сои (соответственно 140 % и 91 % в 2018 г. по отношению к 2012 г.) среди дальневосточных регионов, входящих в топ-10 производителей сои в РФ.

Таким образом, построение и оценка точности модели для прогнозирования урожайности сои в муниципальных образованиях Приморского края является актуальной задачей, решение которой имеет большое теоретическое и народнохозяйственное значение для всех соеопроизводящих регионов Дальнего Востока.

Методология и методы исследования (Methods)

В качестве объектов исследования рассматривались пахотные земли муниципальных районов Приморского края. Как видно из таблицы 1, в 2018 г. первые четыре места по посевной площади сои занимали Ханкайский, Хорольский, Михайловский и Спасский районы. В 2008–2014 гг. на четвертой позиции в Приморском крае находился Октябрьский район. При этом, как следует из таблицы 1, доля сои в общих посевах лидирующих муниципалитетов возросла с 45–58 % в 2012 г. до 61–80 % в 2018 г.

Для расчетов урожайности сои в четырех районах Приморского края – Ханкайском, Хорольском, Михайловском и Октябрьском (рис. 1) – использовались данные показателей муниципальных образований, в частности посевных площадей и валового сбора сои в период с

Таблица 1
Посевная площадь сои в разных муниципальных районах Приморского края в 2012 и 2018 гг.

Муниципальный район Приморского края	Посевная площадь сои, га		Общая посевная площадь, га		Доля сои в общих посевах, %	
	2012	2018	2012	2018	2012	2018
Ханкайский	19 428	44 973	42 010	56 378	46,2	79,8
Хорольский	21 925	44 535	48 447	61 830	45,3	72,0
Михайловский	24 494	42 372	42 060	66 340	58,2	63,9
Спасский	11 201	30 568	23 453	43 627	47,8	70,1
Октябрьский	15 525	25 111	33 270	41 262	46,7	60,9
Черниговский	10 637	18 341	23 098	26 346	46,1	69,6
Кировский	10 528	16 851	22 403	25 704	47,0	65,6
Пограничный	12 909	16 129	20 038	25 145	64,4	64,1
Дальнереченский	5 268	14 296	9 060	15 399	58,1	92,8

Table 1
Soybean sown area in different municipal areas of Primorsky Region in 2012 and 2018

Municipal district	Soybean sown area, ha		Total sown area, ha		Share of soybean in total crops, %	
	2012	2018	2012	2018	2012	2018
Khankayskiy	19 428	44 973	42 010	56 378	46.2	79.8
Khorol'skiy	21 925	44 535	48 447	61 830	45.3	72.0
Mikhaylovskiy	24 494	42 372	42 060	66 340	58.2	63.9
Spasskiy	11 201	30 568	23 453	43 627	47.8	70.1
Oktyabr'skiy	15 525	25 111	33 270	41 262	46.7	60.9
Chernigovskiy	10 637	18 341	23 098	26 346	46.1	69.6
Kirovskiy	10 528	16 851	22 403	25 704	47.0	65.6
Pogranichnyy	12 909	16 129	20 038	25 145	64.4	64.1
Dalnerechenskiy	5 268	14 296	9 060	15 399	58.1	92.8

2008 по 2018 гг. [18]. Спутниковые и метеорологические данные за этот же период по исследуемым районам были получены с использованием информационной системы «VEGA-Science» [19, с. 581; 20, с. 12]. Для оценки эффективности роста растительной биомассы использовались еженедельные значения композитов вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) пахотных земель региона (обозначены на рис. 1 желтым цветом).

Индекс NDVI является наиболее распространенным показателем фотосинтетически активной биомассы и характеризует состояние растительности, в том числе пахотных земель. Для вычисления данного индекса применяется формула:

$$NDVI = \frac{PN - PR}{PN + PR},$$

где PN – значение отражения в инфракрасной области спектра;

PR – значение отражения в красной области спектра.

Таким образом, для построения регрессионной модели нами рассматривались следующие показатели:

y – среднегодовая урожайность сои по муниципальному образованию, ц/га;

x_1 – максимальное значение среди еженедельных композитов вегетационного индекса NDVI по массе пахотных земель муниципального образования;

x_2 – гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК), который вычисляется по формуле:

$$ГТК = \frac{10 \sum P_{T>10^\circ}}{\sum T_{>10^\circ}},$$

где $\sum P_{T>10^\circ}$ – сумма осадков (мм) и $\sum T_{>10^\circ}$ – сумма среднесуточных температур приземного слоя воздуха ($^\circ\text{C}$) за период с $T > 10^\circ\text{C}$;

x_3 – индекс биологической эффективности климата (БЭК), который находится так:

$$БЭК = \frac{0,01 \sum P \sum T_{>10^\circ}}{\sum_{i=1}^{12} 0,0018(25 + t_i)^2 (100 - f_i)},$$

где $\sum P$ – сумма годового количества осадков (мм),
 t_i – среднемесячная температура приземного слоя воздуха, $^\circ\text{C}$,

f_i – среднемесячная относительная влажность воздуха, %;

x_4 – число дней вегетационного периода в календарном году;

x_5 – индекс сухости Будыко, вычисляется по формуле:

$$ИС = \frac{0,18 \sum T_{>10^\circ}}{\sum P};$$

x_6 – суммарная годовая температура почвы (слой 0–10 см), $^\circ\text{C}$;

x_7 – средняя годовая влажность почвы (слой 0–10 см), %;

x_8 – средняя годовая влажность почвы (слой 10–40 см), %.

Многофакторная регрессионная модель строилась в следующем виде:

$$y = b + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_6 + a_7x_7 + a_8x_8$$

с последующим удалением взаимно коррелирующих факторов. Для оценки точности модели рассчитывался показатель MAPE (Mean absolute percentage error) – средняя абсолютная ошибка модели по данным 2008–2017 гг., выраженная в процентах. Ошибка прогнозирования (Absolute percentage error) определялась сравнением фактического показателя урожайности сои в муниципальном районе в 2018 г. со смоделированным значением, полученным по данным 2007–2017 гг., и рассчитывалась по формуле:

$$APE_{2018} = \frac{|y_{2018}^{прогноз} - y_{2018}^{факт}|}{y_{2018}^{факт}} 100.$$

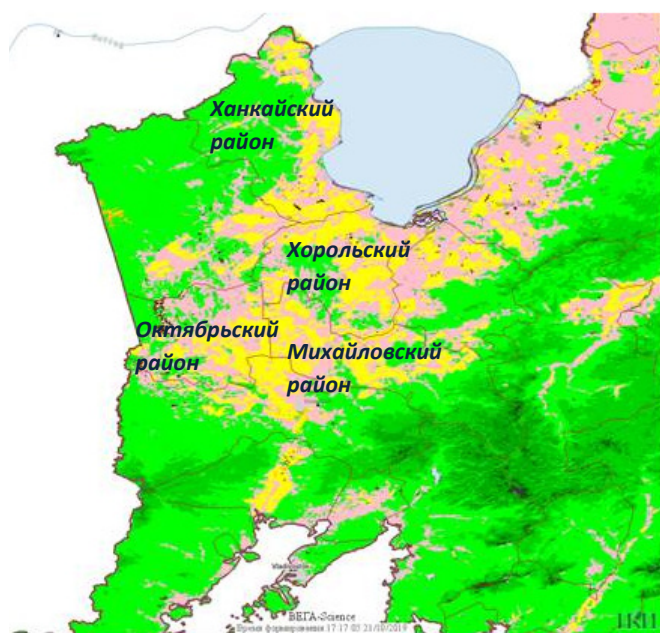


Рис. 1. Пахотные земли юго-запада Приморского края в 2018 г.

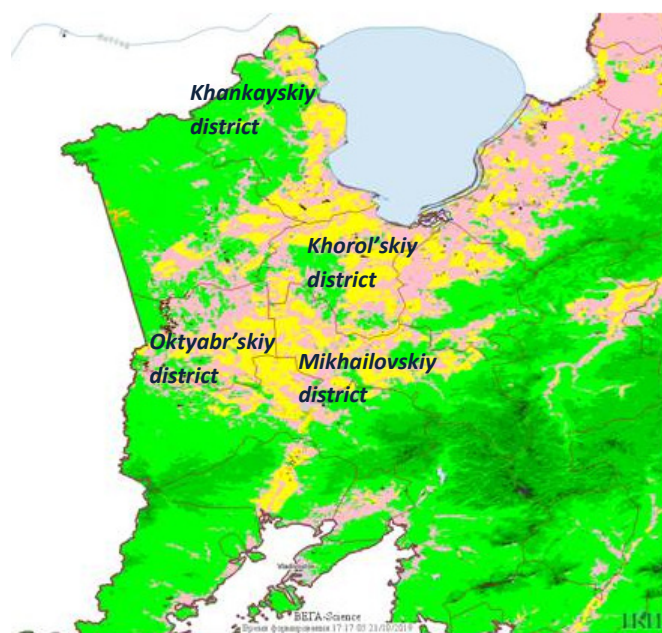


Fig. 1. Sown areas of south-western Primorskiy region in 2018

Результаты (Results)

Для пахотных земель каждого из четырех исследуемых муниципальных образований Приморского края в период с 2008 по 2017 гг. по значениям еженедельных композитов NDVI были определены максимальные значения для каждого года. При этом было установлено, что для всех районов выраженный максимум приходился на 30–32 календарные недели. В таблице 2 для Ханкайского района представлены численные значения урожайности сои, а также показателей, влияющих на урожайность культуры.

Как видно из таблицы 2, урожайность является достаточно вариабельным показателем, коэффициент вариации составляет 22,2. Из независимых переменных модели высокий коэффициент вариации характерен для интегральных показателей (x_2 , x_3 , x_5). Наименьшим образом варьируют x_1 и x_4 : коэффициенты вариации соответственно равны 3,3 % и 2,9 %.

При анализе таблицы 3 можно сделать вывод, что некоторые показатели находятся в достаточно высокой корреляционной зависимости. Так, поскольку x_2 коррелирует с x_3 и x_8 , а x_7 коррелирует с x_8 , в качестве независимых переменных регрессионной модели целесообразно оставить только один из двух показателей, характеризующих влажность почвы, и в качестве интегральной климатической характеристики сохранить в модели ГТК. Индекс сухости Будько находится в обратной корреляционной зависимости с x_2 и x_3 , поэтому также должен быть исключен из уравнения регрессии. С помощью данной матрицы корреляций также возможно предварительно охарактеризовать влияние показателей на урожайность сои в Ханкайском районе. Так, максимальные значения NDVI, индекс ГТК и влажность почвы находятся в прямой зависимости от средней урожайности культуры.

Таблица 2

Численные значения урожайности сои, максимума индекса NDVI и метеорологических характеристик для Ханкайского района в 2008–2018 гг.

	у	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
2008	8,13	0,77	1,61	24,6	154	0,66	1 956	25,2	25,2
2009	6,80	0,796	1,47	28,2	156	0,60	1 600	26,8	24,1
2010	10,67	0,789	1,63	34,8	148	0,56	1 437	31,6	27,1
2011	8,67	0,784	1,24	20,1	150	0,87	1 805	29,0	25,9
2012	9,23	0,829	1,60	31,7	155	0,66	1 537	27,2	25,7
2013	6,62	0,777	1,97	39,4	153	0,59	1 497	33,4	30,9
2014	10,81	0,775	1,67	28,8	160	0,69	1 660	32,4	30,6
2015	8,37	0,787	1,63	28,9	157	0,69	1 788	28,8	27,7
2016	11,51	0,791	2,20	42,3	149	0,51	1 560	31,0	28,9
2017	13,03	0,819	1,83	27,2	150	0,66	1 751	29,8	28,7
2018	12,14	0,855	2,04	35,1	161	0,60	1 686	29,8	29,1
x_{cp}	9,63	0,797	1,72	31,0	154	0,65	1 662	29,5	27,6
σ	2,14	0,03	0,27	6,5	4	0,09	155	2,5	2,2
V, %	22,2	3,3	15,9	21,0	2,9	14,5	9,3	8,4	8,1

Table 2

Numerical values of soybean yield, maximum NDVI index and meteorological characteristics for Khankayskiy district in 2008–2018

	у	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
2008	8.13	0.77	1.61	24.6	154	0.66	1 956	25.2	25.2
2009	6.80	0.796	1.47	28.2	156	0.60	1 600	26.8	24.1
2010	10.67	0.789	1.63	34.8	148	0.56	1 437	31.6	27.1
2011	8.67	0.784	1.24	20.1	150	0.87	1 805	29.0	25.9
2012	9.23	0.829	1.60	31.7	155	0.66	1 537	27.2	25.7
2013	6.62	0.777	1.97	39.4	153	0.59	1 497	33.4	30.9
2014	10.81	0.775	1.67	28.8	160	0.69	1 660	32.4	30.6
2015	8.37	0.787	1.63	28.9	157	0.69	1 788	28.8	27.7
2016	11.51	0.791	2.20	42.3	149	0.51	1 560	31.0	28.9
2017	13.03	0.819	1.83	27.2	150	0.66	1 751	29.8	28.7
2018	12.14	0.855	2.04	35.1	161	0.60	1 686	29.8	29.1
x_{cp}	9.63	0.797	1.72	31.0	154	0.65	1 662	29.5	27.6
σ	2.14	0.03	0.27	6.5	4	0.09	155	2.5	2.2
V, %	22.2	3.3	15.9	21.0	2.9	14.5	9.3	8.4	8.1

Таблица 3

Матрица корреляций показателей регрессионной модели для Ханкайского района

	y	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₈
y	1,00	0,51	0,52	0,15	-0,07	-0,13	0,02	0,30	0,35
x ₁	0,51	1,00	0,17	0,30	0,10	-0,31	-0,26	-0,15	-0,08
x ₂	0,52	0,17	1,00	<u>0,73</u>	-0,05	-0,64	-0,31	0,66	<u>0,82</u>
x ₃	0,15	0,30	<u>0,73</u>	1,00	-0,05	<u>-0,73</u>	-0,66	0,54	0,57
x ₄	-0,07	0,10	-0,05	-0,05	1,00	0,41	0,28	-0,26	0,11
x ₅	-0,13	-0,31	-0,64	<u>-0,73</u>	0,41	1,00	0,63	-0,35	-0,24
x ₆	0,02	-0,26	-0,31	-0,66	0,28	0,63	1,00	-0,54	-0,25
x ₇	0,30	-0,15	0,66	0,54	-0,26	-0,35	-0,54	1,00	<u>0,85</u>
x ₈	0,35	-0,08	<u>0,82</u>	0,57	0,11	-0,24	-0,25	<u>0,85</u>	1,00

Table 3

Regression model correlation matrix for Khankayskiy district

	y	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₈
y	1.00	0.51	0.52	0.15	-0.07	-0.13	0.02	0.30	0.35
x ₁	0.51	1.00	0.17	0.30	0.10	-0.31	-0.26	-0.15	-0.08
x ₂	0.52	0.17	1.00	<u>0.73</u>	-0.05	-0.64	-0.31	0.66	<u>0.82</u>
x ₃	0.15	0.30	<u>0.73</u>	1.00	-0.05	<u>-0.73</u>	-0.66	0.54	0.57
x ₄	-0.07	0.10	-0.05	-0.05	1.00	0.41	0.28	-0.26	0.11
x ₅	-0.13	-0.31	-0.64	<u>-0.73</u>	0.41	1.00	0.63	-0.35	-0.24
x ₆	0.02	-0.26	-0.31	-0.66	0.28	0.63	1.00	-0.54	-0.25
x ₇	0.30	-0.15	0.66	0.54	-0.26	-0.35	-0.54	1.00	<u>0.85</u>
x ₈	0.35	-0.08	<u>0.82</u>	0.57	0.11	-0.24	-0.25	<u>0.85</u>	1.00

Уравнение множественной регрессии, характеризующее зависимость урожайности сои в Ханкайском районе от включенных в модель показателей, построенное по данным 2008–2017 гг., имеет следующий вид:

$$y = -60,5 + 72,9x_1 + 1,53x_2 - 0,13x_4 + 0,008x_6 + 0,5x_7,$$

при этом коэффициент детерминации составляет 0,56. На рис. 2 представлены фактические значения средней урожайности сои в Ханкайском районе в 2008–2018 гг., смоделированные значения в период 2007–2017 гг., а также прогноз урожайности на 2018 г.

Проведенная оценка точности модели показала, что средняя абсолютная ошибка модели находилась на уровне 11 %, а ошибка прогнозирования с использованием регрессионной модели на 2018 г. составила 12,8 %.

Достаточно высокое значение МАРЕ для Ханкайского района обусловлено в том числе и тем, что вариабельность урожайности в сравнении с показателями других ведущих муниципальных образований – производителей сои – имеет наибольшую величину (таблица 4). Так, в Октябрьском и Михайловском районах коэффициент вариации не превышает 19 %, а в Хорольском районе – 13 %.

Средняя продолжительность вегетационного периода в Михайловском и Ханкайском районах в 2008–2018 гг. составляла соответственно 152 и 154 дня, а в Хорольском

и Октябрьском районах – 162 и 164. Наиболее высокая средняя влажность почвы характерна для Михайловского района, при этом в среднем суммарная температура почвы в этом муниципалитете наиболее низкая (1345 °С). Средние значения ГТК в Михайловском и Ханкайском районах были существенно выше, чем соответствующие показатели для Октябрьского и Хорольского районов.

В таблице 5 представлены значения коэффициентов множественной регрессии, а также оценка точности модели для четырех муниципалитетов Приморского края. Коэффициенты детерминации составили соответственно 0,56; 0,82; 0,74 и 0,58 для Ханкайского, Хорольского, Михайловского и Октябрьского районов. Значения МАРЕ для Михайловского и Октябрьского районов находились на уровне 8,9 % и 9,5 %, соответствующий показатель для Хорольского района был равен 4,8 %. При этом ошибка расчета прогнозного значения урожайности сои в 2018 г. была наиболее высока именно в Хорольском районе, что было вызвано влиянием на урожайность сои разных факторов, в том числе агротехнических. Ошибка прогноза урожайности сои в 2018 г. в Михайловском и Октябрьском районах находилась на уровне точности модели – 6,6 % и 14,4 % соответственно.

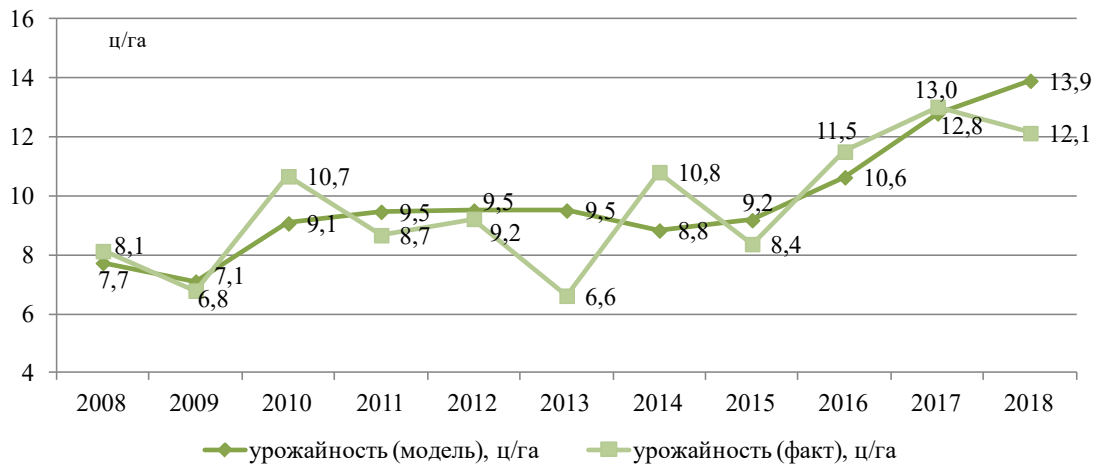


Рис. 2. Фактическая и смоделированная урожайность сои (ц/га) в Ханкайском районе в период с 2008 по 2018 гг.

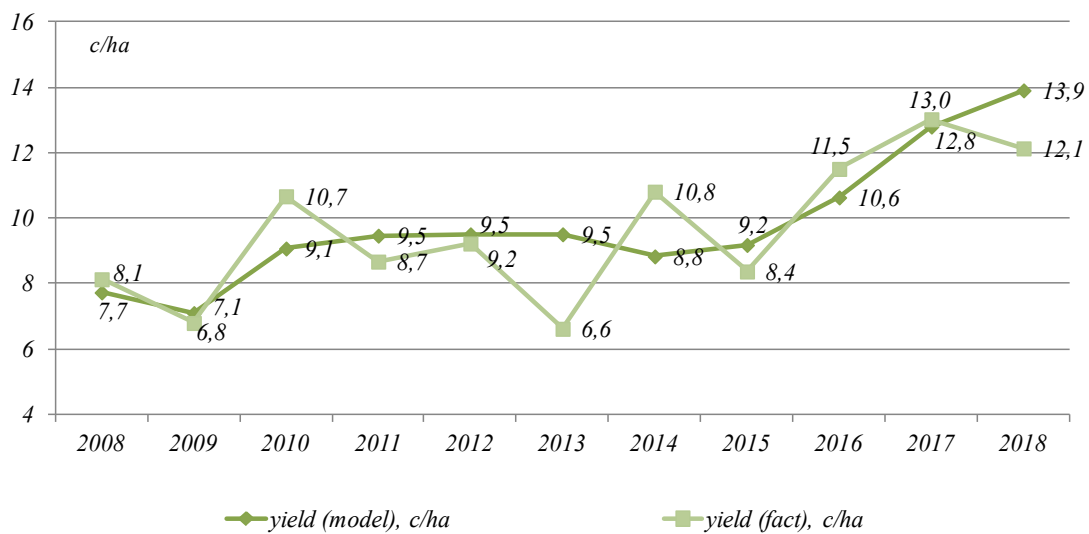


Fig. 2. Fact and model soybean yield (c/ha): Khankayskiy district, 2008–2018

Таблица 4

Статистические характеристики основных показателей, вошедших в регрессионную модель для четырех муниципальных образований Приморского края (по данным 2008–2018 гг.)

Статистические характеристики	y	x ₁	x ₂	x ₄	x ₆	x ₇
Октябрьский						
Мин.	9,4	0,753	0,70	153	1375,8	23,8
Макс.	15,3	0,835	1,69	175	1936	31,9
X _{cp}	12,4	0,787	1,27	164	1619	28,4
V, %	17,3	2,9	25,3	4,1	10,5	8,8
Хорольский						
Мин.	8,2	0,740	0,91	151	1419,6	23,1
Макс.	13,9	0,840	2,06	177	2038	33,2
X _{cp}	11,5	0,781	1,56	162	1623	29,1
V, %	12,8	3,4	22,4	4,7	10,4	10,4
Михайловский						
Мин.	9,1	0,748	1,39	141	1187,8	25,3
Макс.	17,0	0,822	2,50	167	1602	37,0
X _{cp}	13,7	0,774	1,94	152	1345	33,2
V, %	18,5	3,5	19,9	4,6	11,1	9,6
Ханкайский						
Мин.	6,6	0,770	1,24	148	1437,0	25,2
Макс.	13,0	0,855	2,20	161	1956	33,4
X _{cp}	9,6	0,797	1,72	154	1662	29,5
V, %	22,2	3,3	15,9	2,9	9,3	8,4

Table 4
Statistical characteristics of the main indicators included in the regression model for four municipalities of the Primorskiy region (2008–2018)

Characteristics	y	x_1	x_2	x_4	x_6	x_7
Oktyabr'skiy						
Min.	9.4	0.753	0.70	153	1375.8	23.8
Max.	15.3	0.835	1.69	175	1936	31.9
X_{cp}	12.4	0.787	1.27	164	1619	28.4
V, %	17.3	2.9	25.3	4,1	10.5	8.8
Khorol'skiy						
Min.	8.2	0.740	0.91	151	1419.6	23.1
Max.	13.9	0.840	2.06	177	2038	33.2
X_{cp}	11.5	0.781	1.56	162	1623	29.1
V, %	12.8	3.4	22.4	4.7	10.4	10.4
Mikhailovskiy						
Min.	9.1	0.748	1.39	141	1187.8	25.3
Max.	17.0	0.822	2.50	167	1602	37.0
X_{cp}	13.7	0.774	1.94	152	1345	33.2
V, %	18.5	3.5	19.9	4.6	11.1	9.6
Khankayskiy						
Min.	6.6	0.770	1.24	148	1437.0	25.2
Max.	13.0	0.855	2.20	161	1956	33.4
X_{cp}	9.6	0.797	1.72	154	1662	29.5
V, %	22.2	3.3	15.9	2.9	9.3	8.4

Таблица 5
Значения коэффициентов регрессионной модели для определения урожайности сои в районах Приморского края (по данным 2008–2017 гг.)

Муниципальный район Приморского края	b	a_1	a_2	a_4	a_6	a_7	R ²	MAPE, %	APE ₂₀₁₈ , %
Ханкайский	-60,5	72,9	1,53	-0,13	0,008	0,50	0,56	11,0	12,8
Хорольский	-72,6	95,2	-1,44	-0,08	0,013	0,13	0,82	4,8	29,6
Михайловский	-38,9	36,1	1,99	-0,02	0,006	0,49	0,74	8,9	6,6
Октябрьский	-113,2	88,6	-4,4	0,17	0,004	0,98	0,58	9,5	14,4

Table 5
The values of the coefficients of the regression model for determining soybean yield in the areas of Primorskiy region (2008–2017)

District	b	a_1	a_2	a_4	a_6	a_7	R ²	MAPE, %	APE ₂₀₁₈ , %
Khankayskiy	-60.5	72.9	1.53	-0.13	0.008	0.50	0.56	11.0	12.8
Khorol'skiy	-72.6	95.2	-1.44	-0.08	0.013	0.13	0.82	4.8	29.6
Mikhailovskiy	-38.9	36.1	1.99	-0.02	0.006	0.49	0.74	8.9	6.6
Oktyabr'skiy	-113.2	88.6	-4.4	0.17	0.004	0.98	0.58	9.5	14.4

В целом точность предложенной регрессионной модели с использованием метеорологических показателей и спутниковых данных является вполне удовлетворительной для оценки степени влияния совокупности факторов на урожайность сои в муниципальных образованиях и получения первичных прогнозных значений.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Проведенный анализ статистических данных урожайности сои в муниципальных образованиях Приморского края в период с 2008 по 2018 гг., а также климатических

характеристик и вегетационного индекса NDVI пахотных земель, рассчитанного с помощью методов дистанционного зондирования Земли, позволил установить взаимосвязь между показателями и определить параметры многофакторного регрессионного уравнения. В качестве независимых переменных в модель были включены максимум вегетационного индекса NDVI, продолжительность вегетационного периода, ГТК, годовая сумма температур в верхнем слое почвы, средняя годовая влажность верхнего слоя почвы. Оценка точности модели на

примере четырех муниципальных образований Приморского края, являющихся основными районами – производителями сои, показала, что средняя абсолютная ошибка прогнозирования находилась в пределах 4,8–11,0 %.

При этом динамический показатель урожайности сои в каждом районе характеризуется достаточно высоким коэффициентом вариации, что, возможно, свидетельствует о высоком разбросе значений этого показателя по разным полям внутри муниципалитета и ежегодном изменении площади полей в общей структуре посевов. Для повышения точности регионального прогноза в дальнейшем необходимо реализовать предложенную регрессионную модель на уровне отдельных полей не только с

использованием данных дистанционного зондирования Земли, но и с учетом применяемых агротехнических приемов.

В целом полученная точность разработанных моделей является вполне достаточной для решения практических задач регионального производства сои на территории как Приморского края, так и других субъектов ДФО. Предложенные модели могут применяться для прогнозирования урожайности сои и принятия управленческих решений районными департаментами сельского хозяйства и отдельными предприятиями агропромышленного комплекса.

Библиографический список

1. Boyarskiy B. S., Hasegawa H., Lyude A. Demand for Russian soybean based on the needs of food industry in Japan // Scientific support of soybean: problems and prospects. Collection of scientific articles on materials of the International research and practice conference dedicated to the 50th anniversary of the foundation of the All-Russian Scientific Research Institute of Soybean. Blagoveshchensk, 2018. Pp. 36–41.
2. Gaso D. V., Berger A. G., Ciganda V. S. Predicting wheat grain yield and spatial variability at field scale using a simple regression or a crop model in conjunction with Landsat images // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. Vol. 159. Pp. 75–83.
3. Асеева Т. А., Терехова М. В. Рациональные приемы использования сельскохозяйственных земель в Хабаровском крае при возделывании сои // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2016. № 1. С. 168–171.
4. Производство сои: прогноз на сезон 2017/18 [Электронный ресурс] // МНИАП. URL: <http://мниап.рф/analytics/Proizvodstvo-soi-prognoz-na-sezon-2017-18> (дата обращения: 25.09.2019).
5. Минакир П. А. «Программная» экономика: Дальний Восток // Пространственная экономика. 2019. № 2. Т. 15. С. 7–16.
6. Boyarskiy B. Application of NDVI Data to Analyse the Effects of Sowing Methods and Seeding Rates on Soybean Crop Yield // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019. Vol. 14. Pp. 4290–4294.
7. Onojeghuo A. O., G Blackburn. A., Huang J. Applications of satellite “hyper-sensing” in Chinese agriculture: Challenges and opportunities // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2018. Vol. 64. Pp. 62–86.
8. Береза О. В., Страшная А. И., Лупян Е. А. О возможности прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Среднем Поволжье на основе комплексирования наземных и спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. № 1. Т. 12. С. 18–30.
9. Буховец А. Г. [и др.] Моделирование динамики вегетационного индекса NDVI озимой пшеницы в условиях ЦФО // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. Т. 11. № 2. С. 186–199.
10. Панеш А. Х., Цалов Г. В. Прогнозирование урожайности озимой пшеницы на основе сервисов геоинформационных систем // Вестник АГУ. 2017. № 4. С. 175–180.
11. Iizumi T., Shin Y., Kim W. Global crop yield forecasting using seasonal climate information from a multi-model ensemble // Climate Services. 2018. Vol. 11. Pp. 13–23.
12. Boyarskiy B. S., Hasegawa H., Lyude A. Application of NDVI in soybean analysis // Scientific support of soybean: problems and prospects. Collection of scientific articles on materials of the International research and practice conference dedicated to the 50th anniversary of the foundation of the All-Russian Scientific Research Institute of Soybean. Blagoveshchensk, 2018. Pp. 64–71.
13. Спивак Л. Ф. [и др.] Анализ результатов прогнозирования урожайности яровой пшеницы на основе временных рядов статистических данных и интегральных индексов вегетации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. № 2. Т. 12. С. 173–182.
14. Сторчак И. Г., Шестакова Е. О., Ерошенко Ф. В. Связь урожайности посевов озимой пшеницы с NDVI для отдельных полей // Аграрный вестник Урала. 2018. № 6. С. 64–68.
15. Балабайкин В. Ф., Елкин К. В. Влияние изменения климата на урожайность зерновых в Костанайской области // Аграрный вестник Урала. 2014. № 11. С. 54–59.
16. De la Casaa A., Ovandoa G. G., Bressanini L. Soybean crop coverage estimation from NDVI images with different spatial resolution to evaluate yield variability in a plot // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2018. Vol. 146. Pp. 531–547.
17. Горохова С. В. Некоторые особенности формирования мезоклимата на юге Приморского края // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. № 1. Т. 14. С. 1441–1443.
18. Росстат. База данных показателей муниципальных образований [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gks.ru> (дата обращения: 15.09.2019).

19. Толпин В. А. [и др.] Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «ВЕГА» // Оптика атмосферы и океана. 2014. № 7. Т. 27. С. 581–586.

20. Якушев В. П., Дубенок Н. Н., Лупян Е. А. Опыт применения и перспективы развития технологий дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. № 3. Т. 16. С. 11–23.

Об авторах:

Алексей Сергеевич Степанов¹, доктор фармацевтических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории селекции зерновых колосковых культур, ORCID 0000-0001-8395-8350, AuthorID 247904; stepanxx@mail.ru, +7 924 210-91-02

Татьяна Александровна Асеева¹, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник отдела земледелия и защиты растений, ORCID 0000-0001-8471-0891, AuthorID 726527

Константин Николаевич Дубровин², инженер лаборатории численных методов, ORCID 0000-0001-8655-4618, AuthorID 104861

¹ Дальневосточный НИИ сельского хозяйства, Восточное, Россия

² Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия

The influence of climatic characteristics and values of NDVI at soybean yield (on the example of the districts of the Primorskiy region)

A. S. Stepanov¹✉, T. A. Aseyeva¹, K. N. Dubrovin²

¹ Far Eastern Agriculture Research Institute, Vostochnoye, Russia

² Computer Center of Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

✉E-mail: stepanxx@mail.ru

Abstract. The relevance of research. Soybean is one of the key crops in world agriculture; in recent years, soybean production has been actively developing in the Russian Far East. It is necessary to predict yield to solve problems associated with soybean production, including the planning of sown areas and export operations. **The purpose of this study** is: to determine the factors affecting yield, to establish the relationship between these indicators and yield, and to evaluate the accuracy of the model. **Research methods.** We examined climatic features and remote Earth sensing indicators of Khankayskiy, Khorol'skiy, Mikhailovskiy and Oktyabr'skiy districts of the Primorskiy region since 2008 to 2018. Meteorological characteristics of territories and values of vegetation index were obtained using the Vega Science system. Integral coefficients were additionally calculated and mutually correlating indicators were excluded from the regression model. **The main result of the study** is a multiple regression model, where yield is considered as a dependent variable, and the independent variables are: the maximum weekly NDVI, hydrothermal coefficient, duration of the growing season, average annual humidity, and aggregated temperature of the upper soil layer. Mean absolute percentage error of the model is 11.0 % for the Khankayskiy district, 4.8 % for the Khorol'skiy district, 9.5 % for the Oktyabr'skiy district, and 8.9 % for the Mikhailovskiy district. **Scientific novelty and practical relevance.** A regression model, which predict soybean yield, was developed. In general, the proposed model can be used to predict soybean yield, as well as to make managerial decisions at the regional level.

Keywords: soybean, yield, Primorskiy region, climatic characteristics, regression model, remote Earth sensing, NDVI.

For citation: Stepanov A. S., Aseyeva T. A., Dubrovin K. N. The influence of climatic characteristics and values of NDVI at soybean yield (on the example of the districts of the Primorskiy region) // Agrarian Bulletin of the Urals. 2020. No. 01 (192). Pp. 10–19. DOI: 10.32417/1997-4868-2020-192-1-10-19. (In Russian.)

Paper submitted: 22.11.2019.

References

1. Boyarskiy B. S., Hasegawa H., Lyude A. Demand for Russian soybean based on the needs of food industry in Japan // Scientific support of soybean: problems and prospects. Collection of scientific articles on materials of the International research and practice conference dedicated to the 50th anniversary of the foundation of the All-Russian Scientific Research Institute of Soybean. Blagoveshchensk, 2018. Pp. 36–41.

2. Gaso D. V., Berger A. G., Ciganda V. S. Predicting wheat grain yield and spatial variability at field scale using a simple regression or a crop model in conjunction with Landsat images // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. Vol. 159. Pp. 75–83.

3. Aseyeva T. A., Terekhova M. V. Ratsional'nye priemy ispol'zovaniya sel'skokhozyaystvennykh zemel' v Khabarovskom krae pri vozdeleyvanii soi [Methods of rational use of agricultural land in soybean cultivation in the Khabarovsk kray] // Dal'nij Vostok: problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa. 2016. No. 1. Pp. 168–171. (In Russian.)

4. Proizvodstvo soi: prognoz na sezon 2017/18. [Soybean production: forecast on season 2017/18] [e-resource] // MNIAP. URL: <http://mniap.pf/analytics/Proizvodstvo-soi-prognoz-na-sezon-2017-18> (appeal date: 25.09.2019).
5. Minakir P. A. “Programmnyaya” ekonomika: Dal’niy Vostok [“Program” Economy: The Far East] // Spatial Economics. 2019. Vol. 15. No. 2. Pp. 7–16. (In Russian.)
6. Boyarskiy B. Application of NDVI Data to Analyse the Effects of Sowing Methods and Seeding Rates on Soybean Crop Yield // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019. Vol. 14. Pp. 4290–4294.
7. Onojeghuo A. O., G Blackburn. A., Huang J. Applications of satellite “hyper-sensing” in Chinese agriculture: Challenges and opportunities // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2018. Vol. 64. Pp. 62–86.
8. Bereza O. V., Strashnaya A. I., Lupyan E. A. O vozmozhnosti prognozirovaniya urozhaynosti ozimoy pshenitsy v Srednem Povolzh’e na osnove kompleksirovaniya nazemnykh i sputnikovykh dannykh [About the possibility to predict the yield of winter wheat in the Middle Volga region on the basis of integration of land and satellite data] // Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2015. Vol. 12. No. 1. Pp. 18–30. (In Russian.)
9. Bukhovets A. G. [et al.] Modelirovaniye dinamiki vegetatsionnogo indeksa NDVI ozimoy pshenitsy v usloviyakh TsFO [Simulation of the dynamics of the NDVI of winter wheat in the conditions of the Central Federal district] // Vestnik of Voronezh State Agrarian University. 2018. Vol. 11. No. 2. Pp. 186–199. (In Russian.)
10. Panesh A. K., Tsalov G. V. Prognozirovaniye urozhaynosti ozimoy pshenitsy na osnove servisov geoinformatsionnykh system [Prediction of winter wheat productivity on the basis of geographic information system services] // The Bulletin of the Adyge State University. 2017. No. 4. Pp. 175–180. (In Russian.)
11. Iizumi T., Shin Y., Kim W. Global crop yield forecasting using seasonal climate information from a multi-model ensemble // Climate Services. 2018. Vol. 11. Pp. 13–23.
12. Boyarskiy B. S., Hasegawa H., Lyude A. Application of NDVI in soybean analysis // Scientific support of soybean: problems and prospects. Collection of scientific articles on materials of the International research and practice conference dedicated to the 50th anniversary of the foundation of the All-Russian Scientific Research Institute of Soybean. Blagoveshchensk, 2018. Pp. 64–71.
13. Spivak L. F. [et al.] Analiz rezul’tatov prognozirovaniya urozhaynosti yarovoy pshenitsy na osnove vremennykh ryadov statisticheskikh dannykh i integral’nykh indeksov vegetatsii [Analysis of spring wheat yield forecasts based on time series of statistical data and integrated vegetation indices] // Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2015. Vol. 12. No. 2. Pp. 173–182. (In Russian.)
14. Storchak I. G., Shestakova E. O., Eroshenko F. V. Svyaz’ urozhaynosti posevov ozimoy pshenitsy s NDVI dlya otdel’nykh poley [Influence of elements of technology on crop productivity and NDVI of wheat sowings] // Agrarian Bulletin of the Urals. 2018. No. 6. Pp. 64–68. (In Russian.)
15. Balabaykin V. F., Elkin K. V. Vliyaniye izmeneniya klimata na urozhaynost’ zernovykh v Kostanayskoy oblasti [Effects of climate change on grain productivity in Kostanay region] // Agrarian Bulletin of the Urals. 2014. No. 11. Pp. 54–59. (In Russian.)
16. De la Casaa A., Ovandoa G. G., Bressanini L. Soybean crop coverage estimation from NDVI images with different spatial resolution to evaluate yield variability in a plot // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2018. Vol. 146. Pp. 531–547.
17. Gorokhova S. V. Nekotorye osobennosti formirovaniya mezoklimata na yuge Primorskogo kraya [Some features of formation a mesoclimate in the south Primorskiy region] // Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2012. Vol. 14. No. 1. Pp. 1441–1443. (In Russian.)
18. Rosstat. Baza dannykh pokazateley munitsipal’nykh obrazovaniy [Rosstat. Data base of municipalities]. URL: <https://www.gks.ru> (appeal date: 15.09.2019).
19. Tolpin V. A. [et al.] Vozmozhnosti analiza sostoyaniya sel’skokhozyaystvennoy rastitel’nosti s ispol’zovaniem sputnikovogo servisa “VEGA” [Possibilities of agricultural vegetation condition analysis with the “VEGA” satellite service] // Atmospheric and Oceanic Optics. 2014. Vol. 27. No. 7. Pp. 581–586. (In Russian.)
20. Yakushev V. P., Dubenok N. N., Lupyan E. A. Opyt primeneniya i perspektivy razvitiya tekhnologiy distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya sel’skogo khozyaystva [Earth remote sensing technologies for agriculture: application experience and development prospects] // Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2019. Vol. 16. No. 3. Pp. 11–23. (In Russian.)

Authors’ information:

Alexey S. Stepanov¹, doctor of pharmaceutical sciences, leading researcher, cereal breeding laboratory, ORCID 0000-0001-8395-8350 AuthorID 247904; stepanxx@mail.ru, +7 924 210-91-02

Tatyana A. Aseyeva¹, doctor of agriculture sciences, leading researcher, laboratory of agriculture and plant protection, ORCID 0000-0001-8471-0891, AuthorID 726527

Konstantin N. Dubrovin², numerical method engineer, ORCID 0000-0001-8655-4618, AuthorID 104861

¹ Far Eastern Agriculture Research Institute, Vostochnoye, Russia

² Computer Center of Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia