

СТАТЬИ

УДК 631.9

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ФИЗИКО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ НА УРОЖАЙНОСТЬ СОИ
МЕТОДОМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

¹Буйлов В.Н., ¹Косарев А.В., ¹Чумакова С.В., ²Мавзовин С.В.

¹ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова», Саратов, e-mail: aleteia@inbox.ru;

²ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, e-mail: MavzovinVS@mgsu.ru

С помощью метода дистанционного зондирования Земли в работе рассмотрено влияние физико-климатических факторов районов Саратовской области на урожайность сои. В качестве характеристик, определяющих агрофизические свойства почвы, выбраны вегетационные индексы: стандартизированный индекс различий увлажненности (NDMI), почвенный вегетационный индекс (SAVI), нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI). Установлена статистически значимая корреляционная взаимосвязь между индексами NDMI, SAVI, NDVI и урожайностью сои. Также установлено, что урожайность сои характеризуется линейной регрессионной зависимостью от рассмотренных вегетационных индексов. Выявлено, что урожайность сои в наибольшей степени зависит от величины засушливости и во вторую очередь примерно одинаково от фотосинтетической продуктивности биомассы и контрастности почвенного фактора по отношению к зеленой биомассе сои. Показано, что аридность районов Саратовской области увеличивается в следующем порядке: Хвалынский район – Балаковский район – Пугачевский район – Аткарский район – Марковский район – Ершовский район – Дергачевский район – Новоузенский район. В этом порядке снижается урожайность сои. При этом контрастность отражения между почвой и растительностью снижается, что связано с уменьшением фотосинтетической активности биомассы. Полученные в работе данные имеют практическое значение, связанное с планированием мелиоративных мероприятий, направленных на ее повышение увлажненности и газообмена в почве.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, вегетационные индексы, засушливость, урожайность, соя

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF PHYSICAL
AND CLIMATIC FACTORS OF THE SARATOV REGION
ON SOYBEAN YIELD BY REMOTE SENSING OF THE EARTH**

¹Buylov V.N., ¹Kosarev A.V., ¹Chumakova S.V., ²Mavzovin V.S.

¹Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, e-mail: aleteia@inbox.ru;

²Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, e-mail: MavzovinVS@mgsu.ru

In the work, using the method of remote sensing of the Earth, the influence of soil and climatic factors of the districts of the Saratov region on the yield of soybeans is considered. Vegetation indices have been selected as characteristics determining the agrophysical properties of the soil: the standardized index of moisture differences (NDMI), the soil vegetation index (SAVI), the normalized difference vegetation index (NDVI). A statistically significant correlation was established between the NDMI, SAVI, NDVI indices and soybean yield. It is also established that soybean yield is characterized by a linear regression dependence on the considered vegetation indices. It was revealed that the yield of soybeans depends to the greatest extent on the amount of aridity, and secondly, approximately equally on the photosynthetic productivity of biomass and the contrast of the soil factor in relation to the green biomass of soybeans. It is shown that the aridity of the districts of the Saratov region increases in the following order: Khvalynsky district – Balakovsky district – Pugachevsky district – Atkarsky district – Markovskiy district – Yershovskiy district – Dergachevskiy district – Novouzenskiy district. In this order, the yield of soybeans decreases. At the same time, the contrast of reflection between soil and vegetation decreases, which is associated with a decrease in the photosynthetic activity of biomass. The data obtained in the work are of practical importance related to the planning of reclamation measures aimed at increasing its moisture content and gas exchange in the soil.

Keywords: remote sensing, vegetation indices, aridity, yield, soybean

Соевые бобы являются одними из немногих продуктов растительного происхождения, в составе которых имеются двенадцать незаменимых аминокислот. Эти аминокислоты определяют белковый метаболизм организмов людей и сельскохозяйственных животных. В этой связи расширение зоны эффективного культивирования сои становится важной научно-технической задачей.

Одним из путей решения этой научно-технической задачи является определение влияния почвенно-климатических факторов на урожайность сои и оценка их значимости. Известно, что значения общей пористости почвы и пористости аэрации являются важными характеристиками, определяющими урожайность сои в средней полосе России [1, с. 18]. Учет этих характеристик

позволяет назначить комплекс агротехнических мероприятий, направленных на повышение биопродуктивности сои, таких как прямой посев, севооборот и обработка почвы с использованием прогрессивной почвообрабатывающей техники [2, с. 70; 3, с. 15]. Эти показатели влияют на влагообеспеченность почвы, имеющую прямую корреляцию с ее урожайностью [4, с. 82]. Также урожайность сои увеличивается при ее посадке на поле, где перед этим росла одна из следующих культур: кукуруза, сорго и подсолнечник [5, с. 11; 6, с. 3]. Среди климатических условий, влияющих на урожайность сои, важную роль играют атмосферные осадки в весенне-летний период, которые обеспечивают необходимую влажность почвы. В этой связи определение зон, где можно эффективно возделывать сою, является актуальной задачей [7, с. 25].

Расположенная в зоне умеренно континентального климата, Саратовская область является аридным регионом, земледелие которого определяется комплексом агротехнических мероприятий, направленных на повышение увлажненности почвы с учетом мониторинга ее значений.

Мониторинг значений влажности почвы можно проводить непосредственным и дистанционным зондированием. В настоящее время дистанционное зондирование поверхности Земли является одним из информативных и эффективных методов исследования агроэкологических и агроинженерных свойств почвы и биопродуктивности растений, а также влияния на них окружающей среды. Этот подход позволяет устанавливать влияние засухи, пожаров и фитосанитарного состояния посевных площадей на урожайность сельскохозяйственных культур. Преимуществом такого подхода является его экономичность, а также возможность проводить одновременный сравнительный анализ состояния наделов, находящихся в разных климатических условиях на значительном удалении друг от друга.

При этом основными характеристиками, связывающими спектрометрические характеристики территории и состояние биомассы, являются вегетационные индексы. Они оцениваются на двух стабильных максимумах отражательной способности растений: максимуме поглощения хлорофилла, находящегося в красной области, и максимуме отражения солнечной радиации клеточной структурой листовой пластины [8, с. 3]. Почвенный фактор также влияет на растительные вегетационные индексы, поэтому для учета этого влияния необходима коррекция спектральных измерений загрязненности почвы [9, с. 67]. При

геоинформационном растровом анализе почвенных карт и карт распределения вегетационных индексов отмечено, что индекс растительности, с оптимизированным учетом почвы (OSAVI), позволяет установить пространственные границы между основными типами почв с различными режимами увлажнения. При этом низкие значения вегетационного индекса характерны для почв гидроморфного режима увлажнения, сформировавшихся вблизи берегов небольших озер [10, с. 120]. Применение нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) к исследованию плодородия посевов позволяет определить недостаток увлажнения как причину низкой биопродуктивности выращиваемой культуры [11, с. 34]. Сравнение величины этого индекса, в различные фазы вегетации сельскохозяйственной культуры, как при условии внесения подкормок, так и без них, позволяет оценивать эффективность мелиоративных мероприятий, направленных на рациональное использование агросферы [12, с. 27]. Применение гиперспектрального дистанционного зондирования позволяет понизить спектральную область захвата, что улучшает качество исследования физиологических характеристик растений и их ответа на изменение состояния окружающей среды, а также позволяет выявлять обеспеченность растительного организма питательными веществами. Расширение теоретической базы точного земледелия за счет возрастания возможностей вычислительной базы, основанной на повышении качества разрешения космоснимков и их частоты, позволяет исследовать агрохимические и агрофизические характеристики почв и сельскохозяйственных культур [13, с. 11].

Цель исследования – с помощью данных дистанционного зондирования определить взаимосвязь между урожайностью сои и вегетационными индексами, характеризующими качество почв, расположенных на различных по аридности территориях Саратовской области.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- оценка вегетационных индексов, характеризующих агрофизические свойства почвы – стандартизованного индекса различий увлажненности (*Normalized Difference Moisture Index, NDMI*), почвенного вегетационного индекса (*Soil-Adjusted Vegetation Index, SAVI*) и нормализованного разностного вегетационного индекса (*Normalized Difference Vegetation Index, NDVI*);
- исследование корреляционной взаимосвязи между этими индексами и урожайностью сои, выращенной на почвах, рас-

положенных на различных по аридности территориях Саратовской области.

Материалы и методы исследования

Использование спутниковой информации для диагностики состояния сельскохозяйственных полей – актуальное направление современной аграрной науки. Для решения задач экологической и сельскохозяйственной оценки территорий, с помощью методов дистанционного зондирования, применяются вегетационные индексы. При сборе и анализе картографического материала использовались данные о высотных профилях местности. Для цифровой модели рельефа применялись показатели *SRTM* (*NASA Shuttle Radar Topography Mission*). Значения для исследования поверхности Земли, расположенной между 60 параллелью северной широты и 54 параллелью южной широты, поставляются в варианте сетки с размером ячейки 3 угловые секунды (*SRTM3*). Файлы представляют собой матрицу из 1201x1201 значений.

Исходными материалами при дистанционном зондировании нами использованы мультиспектральные снимки со спутника *Landsat 8* с применением двух инструментов, *Operational Land Imager (OLI)* и *Thermal InfraRed Sensor (TIRS)*. *OLI* сканирует объекты в 9 диапазонах видимого спектра и ближнего инфракрасного излучения, *TIRS* – в двух диапазонах инфракрасного излучения. Размер пикселя при сканировании – 30 × 30 м. Ширина полосы съемки – 1,85·10⁵ м.

Обработка данных *SRTM* и картографирование полученного материала проводилось с помощью программного комплекса *QGIS* (версия 3.28.0) с системой координат проекции Мир *WGS 1984 World Mercator*. Статистическая обработка полученных данных реализована в программном комплексе *Statistica* (версия 10). Интерпретация полученных данных проведена методом одноканального псевдоцветного изображения (рис. 1–3).

Стандартизованный индекс различий увлажненности (*NDMI*) характеризует уровень влажности в растительности для оценки засушливости среды и подсчитывается по формуле [14, с. 435]:

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}, \quad (1)$$

где *NIR* и *SWIR* – показатели эффективности отражения в ближнем и коротковолновом инфракрасном спектральных каналах соответственно в мультиспектральном снимке.

Нормализованный относительный индекс растительности *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*) подсчитывается по формуле [15, с. 340]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (2)$$

где *NIR* и *RED* – соответственно показатели эффективности отражения в ближнем и красном каналах в мультиспектральном снимке.

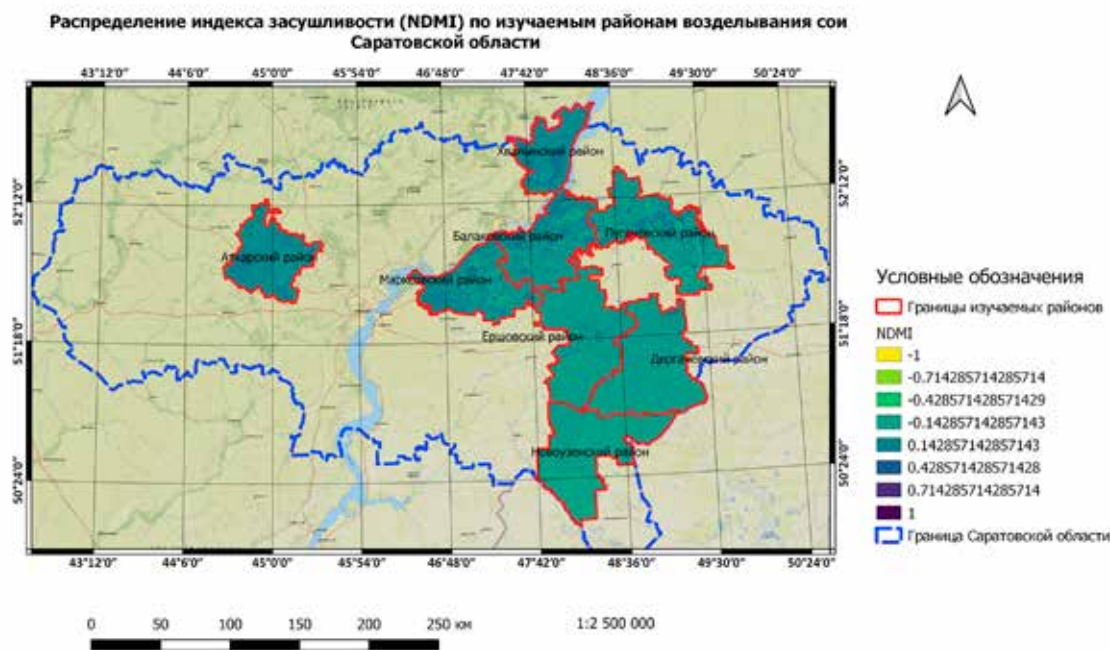


Рис. 1. Карта распределения индекса засушливости *NDMI* по районам возделывания сои в Саратовской области

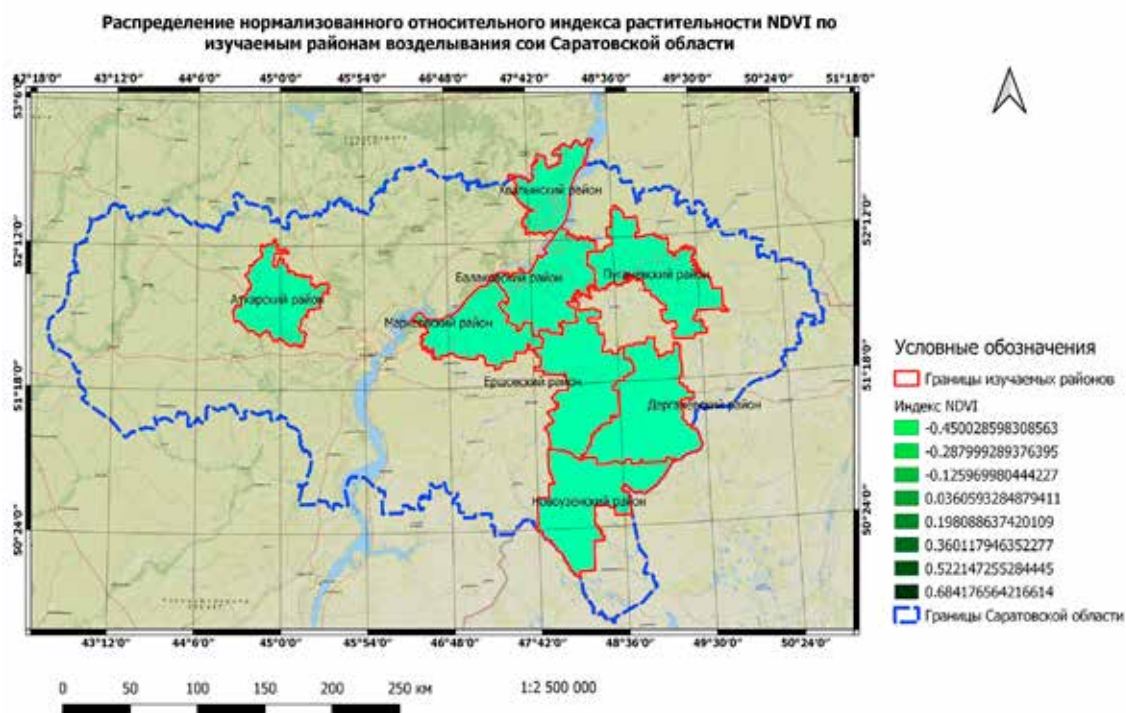


Рис. 2. Карта распределения индекса NDVI по районам возделывания сои в Саратовской области

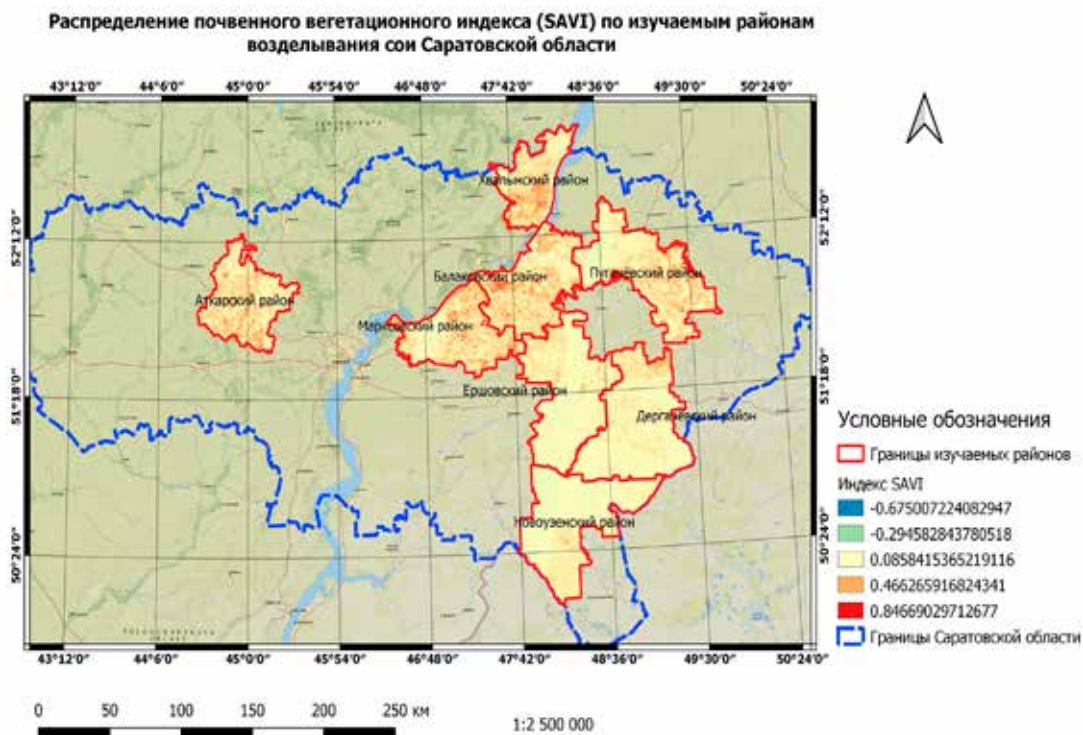


Рис. 3. Карта распределения индекса SAVI по районам возделывания сои в Саратовской области

Средние значения вегетационных индексов и урожайность сои в районах Саратовской области, отличающихся по засушливости

Район	NDMI	NDVI	SAVI	Урожайность, ц/га
Хвалынский	-0,0287	0,7831	0,8154	24,2
Балаковский	-0,0356	0,7845	0,7822	20,1
Пугачевский	-0,0452	0,7613	0,7534	24,8
Аткарский	-0,0622	0,7153	0,7212	22,5
Марковский	-0,0771	0,7005	0,7134	17,2
Ершовский	-0,0782	0,6847	0,7516	20,2
Дергачевский	-0,0834	0,6622	0,6822	12,3
Новоузенский	-0,0867	0,6517	0,6673	11,1

Почвенный вегетационный индекс (*Soil-Adjusted Vegetation Index, SAVI*) определяется по формуле

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} \cdot (1 + L), \quad (3)$$

где L – коэффициент облиствения, $L \in [0;1]$, $L = 0$ для наибольшего индекса облиствения, $L = 1$ для наименьшего. В формуле (3) применялось оптимальное значение $L = 0,5$, так как при данном значении индекс позволяет минимизировать влияние яркости почвы на отражательную способность растений.

Изучались следующие районы выращивания сои в Саратовской области: Дергачевский, Новоузенский, Пугачевский, Марковский, Хвалынский, Балаковский, Аткарский, Ершовский. Эти районы различаются по физико-климатическим характеристикам, определяющим плодородие почвы, в частности по ее влажности и засушливости. Информация по урожайности сои в данных районах предоставлена производителями сельскохозяйственной продукции. Средние значения вегетационных индексов и урожайность сои в изучаемых районах представлены в таблице.

Результаты исследования и их обсуждение

Сравнительная характеристика засушливости территорий отражена усиливающейся градиентной окраской карты от менее к более засушливой (рис. 2). Полученные результаты свидетельствуют о том, что аридность районов Саратовской области увеличивается в следующем порядке: Хвалынский район – Балаковский район – Пугачевский район – Аткарский район – Марковский район – Ершовский район – Дергачевский район – Новоузенский район (рис. 1–3).

Оценка влияния физико-климатических факторов на урожайность сои осуществлена проведением корреляционного анализа величин урожайности и вегетационных индексов. Построенная матрица множествен-

ной корреляции (рис. 4) содержит статистически значимые коэффициенты корреляции (выделены красным цветом) между вегетационными индексами и урожайностью.

Анализ корреляционных взаимосвязей между вегетационными индексами и урожайностью позволяет утверждать, что наиболее тесные корреляционные соотношения существуют между индексами *NDMI* и *NDVI*, *SAVI* и *NDMI*. Величина урожайности показывает значительный разброс относительно линейной зависимости.

Для оценки вида нелинейной регрессии между изучаемыми параметрами произведен сравнительный анализ тесноты корреляционной взаимосвязи в рамках нескольких линейных моделей. Установлено, что статистически значимыми являются результаты применения линейной регрессии к описанию взаимосвязи зависимого параметра (урожайности сои) от независимых параметров (вегетационных индексов).

Таким образом, уравнения регрессионной взаимосвязи можно представить следующим образом:

$$Урожайность = 30,0452 + 176,9502 \cdot NDMI, \quad (4)$$

$$Урожайность = -37,8378 + 79,2406 \cdot NDVI, \quad (5)$$

$$Урожайность = -43,6041 + 85,1466 \cdot SAVI, \quad (6)$$

Распределение остатков вблизи прямой зависимости ожидаемого нормального значения урожайности от величины остатка для вегетационных индексов (рис. 5) свидетельствует о статистической значимости регрессионных моделей.

Исходя из величины коэффициента b перед значением вегетационного индекса в соответствующем регрессионном уравнении, можно сделать вывод, что урожайность сои в наибольшей степени зависит от величины – засушливости (*NDMI*) и во вторую очередь – примерно одинаково – от фотосинтетической продуктивности биомассы (*NDVI*) и контрастности почвенного фактора по отношению к зеленой биомассе сои (*SAVI*).

Correlations (Saratov_soy)				
Marked correlations are significant at $p < .05000$				
N=8 (Casewise deletion of missing data)				
Variable	NDMI	NDVI	SAVI	Урожайность, ц /га
NDMI	1,000000	0,983558	0,892621	0,783276
NDVI	0,983558	1,000000	0,896591	0,810443
SAVI	0,892621	0,896591	1,000000	0,821630
Урожайность, ц/га	0,783276	0,810443	0,821630	1,000000

Рис. 4. Матрица множественной корреляции между значениями индексов *NDMI*, *NDVI*, *SAVI* и урожайностью сои (ц/га)

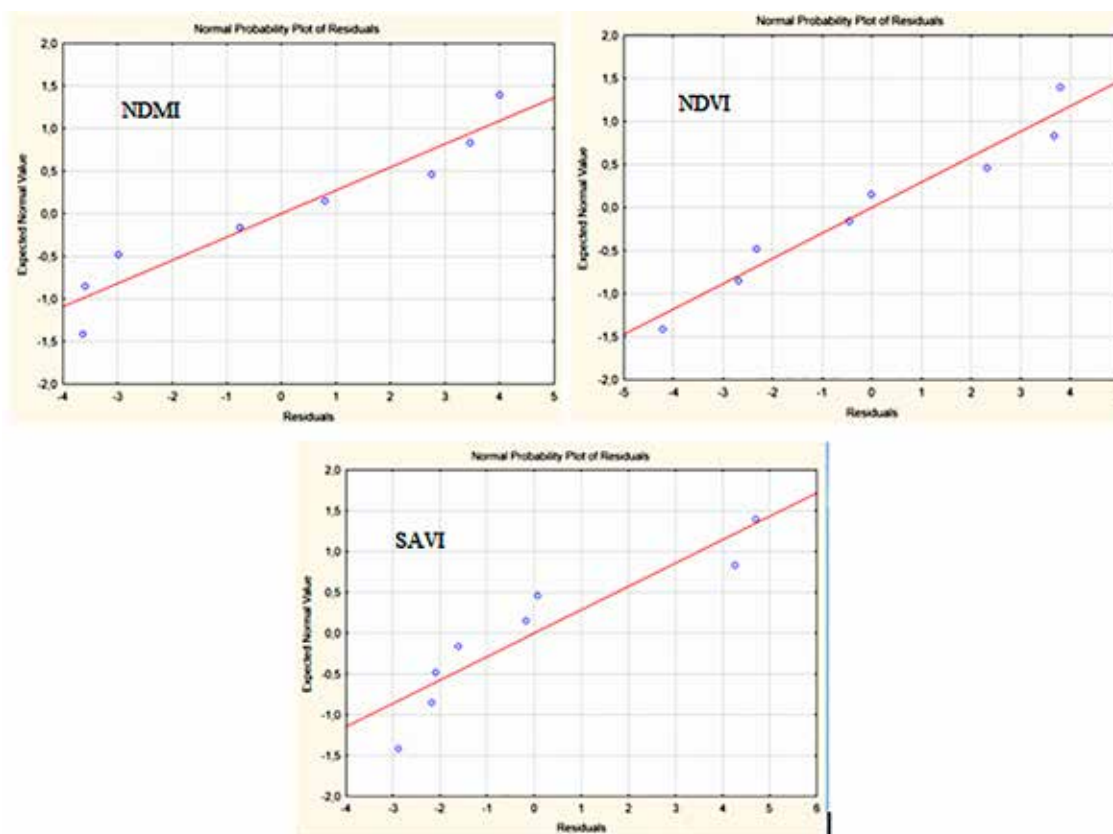


Рис. 5. Разброс величины остатков вблизи прямой ожидаемого нормального значения урожайности сои от величины остатка для вегетационных индексов

Оптимальное соотношение между индексами *NDMI*, *NDVI*, характеризующими влияние климатического фактора на биопродуктивность сои (рис. 6, а), соответствует диапазону изменения *NDMI* [-0,08 ... -0,07], *NDVI* [0,70 ... 0,74], и урожайности [15 ... 20] (ц/га). Понижение величины *NDVI* ниже диапазона оптимальных значений свидетельствует о нехватке влаги или питательных элементов и необходимости проведения мелиоративных мероприятий, направленных на ее повышение: боронования, вспашки, соблюдения норм полива, а также внесения в каштановые почвы биостимуляторов роста, что увеличи-

вает продуктивность зеленой фитомассы. В наибольшей степени почвенный фактор характерен для черноземных почв, типичных для северных районов Саратовского правобережья. В условиях средней величины суммарный коэффициент отражения *SAVI* агрегирует вклады сельскохозяйственной культуры и почвы (рис. 6, б). С севера на юг области тип почв меняется от черноземной к каштановым, а структура почвы меняется с глинистой к песчаной и супесчаной. При этом контрастность отражения между почвой и растительностью снижается, что связано с уменьшением величины зеленой биомассы.

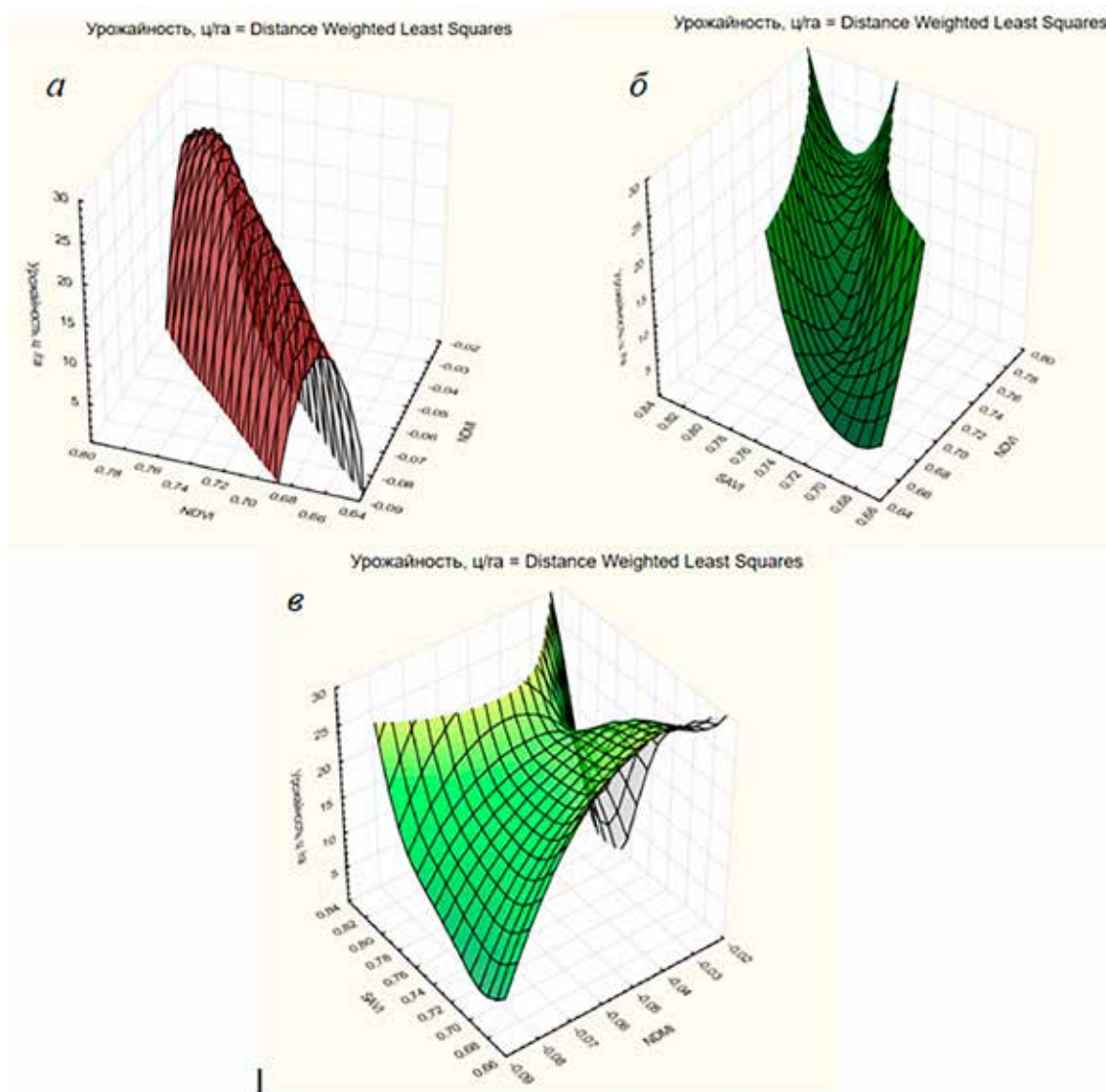


Рис. 6. 3D-зависимость совместного влияния вегетационных индексов на урожайность сои:
 а) NDMI, NDVI; б) NDVI, SAVI; в) NDMI, SAVI

Индекс NDMI, снижение которого отвечает возрастанию засушливости климата, несет информацию об актуальности проведения мелиоративных мероприятий, направленных на повышение влажности почвы: полива, вспашки.

Оптимальное соотношение между индексами SAVI, NDMI и урожайностью сои (рис. 6, в) соответствует диапазону изменения SAVI [0,78...0,82], NDMI [-0,07...-0,04], урожайности сои [15...20] (ц/га). Дефицит влагообеспеченности приводит к снижению показателя всхожести сельскохозяйственной культуры и сокращению времени созревания, сопровождающимся понижением продуктивности биомассы и увеличением степени разреженности соответствующего сельскохозяйственного участка.

Анализ данных (рис. 6, а, в) позволяет заключить, что при снижении данных индексов NDMI относительно минимального значения в данных интервалах необходимо применение мелиоративных мероприятий, направленных на увеличение увлажненности почвы.

Заключение

Установлено, что величина урожайности сои коррелирует с вегетационными индексами, характеризующими продуктивность биомассы (NDVI), засушливость климата (NDMI) и степень контрастности отражения почвенного покрова относительно растительности. Линейная регрессионная зависимость урожайности от данных индексов показала, что урожайность сои

в наибольшей степени зависит от величины индекса засушливости (*NDMI*) и во вторую очередь – примерно одинаково – от фотосинтетической продуктивности биомассы (*NDVI*) и величины почвенного вегетационного индекса (*SAVI*). Неравномерность распределения определенных индексов на изучаемых территориях может быть связана с неоднородностью посевов, а также различной продуктивностью сои. Установлены средние интервалы значений между вегетационными индексами и урожайностью сои, при выходе за которые рекомендуется производить мелиоративные мероприятия, направленные на увлажнение почвы.

Список литературы

1. Смольский Е.В., Шпилев Н.С., Силаев А.Л. Влияние общих физических свойств серой лесной почвы на урожайность сои // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 5 (93). С. 17–25.
2. Сорокина М.В., Лобков В.Т., Абакумов Н.И., Бобкова Ю.А. Урожайность и качество зерна сои при различной интенсивности обработки почвы // Агробизнес и экология. 2015. Т. 2. № 2. С. 69–71.
3. Епифанцев В.В., Панасюк А.Н., Осипов Я.А., Вайтехович Ю.А. Влияние углубления почвы на урожайность сои при посеве различными агрегатами // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2020. Т. 50. № 1. С. 13–22.
4. Пашенко В.Ф., Сыромятников Ю.Н., Храмов Н.С., Войнаш С.А. Влияние локального рыхления почвы на урожайность сои // Тракторы и сельхозмашины. 2019. № 5. С. 79–86.
5. Никульчев К.А., Банецкая Е.В. Влияние культур севооборота на микробиологическую активность, агрофизические свойства почвы и урожайность сои // Земледелие. 2020. № 1. С. 11–14.
6. Mulazzani R.P., Gubiani P.I., Zanon A.J., Drescher M.S., Schenato R.B., Girardello V.C. Impact of soil compaction on 30-year soybean yield simulated with CROPGRO-DSSAT // Agricultural Systems. 2022. Vol. 203. P. 103523.
7. Нозинич М., Пржужль Н., Тркуля В. Влияние потепления климата на производство полевых культур // Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 2 (10). С. 23–31.
8. Классификатор тематических задач оценки природных ресурсов и окружающей среды, решаемых с использованием материалов ДЗЗ. Редакция 7. ООО «Байкальский центр», ООО Инженерно-технологический Центр «СканЭкс». Иркутск, 2008.
9. Асадов Х.Г., Фатуллаев С.А., Зейналова А.Н. Вопросы контроля загрязненности почвы с использованием вегетационных индексов // Контроль. Диагностика. 2012. № 3. С. 65–68.
10. Павлова А.И. Применение вегетационных индексов для цифрового почвенного картографирования на основе космических снимков Sentinel-2 // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2021. Т. 13. № 6. С. 119–131.
11. Уфимцева М.Г., Кузнецов С.Э. Мониторинг орошаемых агроландшафтов методами дистанционного зондирования // Агропродовольственная политика России. 2021. № 4. С. 33–36.
12. Коношина С.Н., Коношин И.В., Прудникова Е.Г. Использование технологий точного земледелия при возделывании озимой пшеницы в условиях Орловской области // Вестник аграрной науки. 2022. № 2 (95). С. 26–30.
13. Блохина С.Ю. Применение дистанционного зондирования в точном земледелии // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2018. № 5. С. 10–16.
14. Skakun R.S., Wulder. M.A., Franklin S.E. Sensitivity of the thematic mapper enhanced wetness difference index to detect mountain pine beetle red-attack damage // Remote Sensing of Environment. 2003. Vol. 86. P. 433–443.
15. Gopp N.V., Savenkov O.A. Relationship between the NDVI, yield of spring wheat and properties of the plow horizon of eluviated clay-illuvial chernozems and dark gray soils // Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 52, Is. 3. P. 339–34.