

СТАТЬЯ

УДК 631.9:633(470.44)
DOI 10.17513/use.38311

ВЛИЯНИЕ АРИДНОСТИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЛЕЙ САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

¹Косарев А.В., ¹Ключиков А.В., ¹Русинов А.В., ¹Колганов Д.А.,
¹Алексеев В.С., ²Симонова З.А.

¹ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии
и инженерии имени Н.И. Вавилова», Саратов;

²ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»,
Саратов, e-mail: aleteia@inbox.ru, Krok9407@mail.ru, rusinovsar@yandex.ru, ch-sv@yandex.ru,
dmi.kolg@mail.ru, alekseevlad1997@gmail.com, simonovaza@yandex.ru

Целью исследования являлось изучение пространственного распределения поверхностной температуры поля на сельскохозяйственных территориях, отличающихся по засушливости. Объектом исследования являлись почвы полей, расположенных в правобережье и левобережье Саратовской области, в районах, различающихся по аридности. Данные о влажности почвы и о значениях вегетационных индексов относились к июлю 2024 г. В качестве исходных материалов для задач дистанционного зондирования применялись мультиспектральные снимки, полученные спутником Landsat 8. Обработка космоснимков и картографирование полученного материала проводились с помощью программного комплекса QGIS (версия 3.28.0). Статистическая обработка полученных данных реализована в программном комплексе Statistica (версия 10). Данные инфракрасного канала были обработаны с помощью модуля RS&GIS с целью определения температуры поверхности территории. Для оценки уровня аридности территории применялся стандартизованный индекс различий увлажненности. Понижение индекса NDMI соответствует увеличению аридности климата. Установлено, что аридность районов Саратовской области увеличивается при переходе с севера на юг. Температура поверхности земли распределяется неравномерно из-за полива и удобрения почв, рельефа местности, различий в культуре и других факторов, таких как солнечная инсоляция и движение воздушных масс. Взаимосвязь между температурой поверхности агроценоза и стандартизованным индексом различий увлажненности соответствует критерию нормального распределения. Корреляция оценивалась с помощью критерия Спирмена, и статистически значимые значения отклонялись от нулевой гипотезы о равенстве коэффициента корреляции нулю. Показано, что аридность и средняя температура поверхности земли увеличиваются с севера на юг. Непостоянное распределение температуры поверхности в сельскохозяйственных угодьях объясняется поливом, удобрением почв, особенностями рельефа и типом растительности. Температура поверхности сельскохозяйственных угодий линейно уменьшается с ростом стандартизованного индекса различий увлажненности.

Ключевые слова: стандартизованный индекс различий увлажненности, температура поверхности почвы, поле, аридность

THE INFLUENCE OF ARIDITY ON THE DISTRIBUTION OF SURFACE TEMPERATURE OF AGRICULTURAL FIELDS IN THE SARATOV REGION

¹Kosarev A.V., ¹Klyuchikov A.V., ¹Rusinov A.V., ¹Kolganov D.A.,
¹Alekseev V.S., ²Simonova Z.A.

¹Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering
named after N.I. Vavilov, Saratov,

²Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov,
e-mail: aleteia@inbox.ru, Krok9407@mail.ru, rusinovsar@yandex.ru, ch-sv@yandex.ru,
dmi.kolg@mail.ru, alekseevlad1997@gmail.com, simonovaza@yandex.ru

The purpose of the work was to study the spatial distribution of the surface temperature of the field in agricultural areas differing in aridity. Materials and methods. The object of the study was the soils of fields located on the right bank and left bank of the Saratov region, in areas differing in aridity. Data on soil moisture and vegetation index values were used as of July 2024. Satellite images were processed, and the resulting material was mapped using the QGIS software package (version 3.28.0). Statistical processing of the data obtained is implemented in the Statistica software package (version 10). The infrared data were processed using the RS&GIS module to determine the surface temperature of the area. To assess the level of aridity of the territory, a standardized index of differences in humidity was used to assess the level of aridity of the territory. Results and discussion. A decrease in the NDMI index corresponds to an increase in climate aridity. It has been established that the aridity of the districts of the Saratov region increases with the transition from north to south. The temperature of the earth's surface is distributed unevenly due to watering and fertilization of soils, terrain, differences in culture, and other factors such as solar insolation and the movement of air masses. The relationship between the surface temperature of the agroecosystem and the standardized index of moisture differences corresponds to the criterion of normal distribution. The correlation was estimated using the Spearman test, and statistically significant values deviated from the null hypothesis that the correlation coefficient was equal to zero. Conclusion. It is shown that aridity and the average temperature of the earth's surface increase from north to south. The variable distribution of surface temperature in agricultural lands is explained by irrigation, soil fertilization, topography features and vegetation type.

Keywords: standardized index of moisture differences, soil surface temperature, field, aridity

Введение

Солнечная радиация является одним из основных факторов энергетического баланса поверхности земли, влияющего на экологически важные характеристики микроклимата, включая температуру поверхности сельскохозяйственных угодий, потребности в испарении и влажности почвы. При этом температура поверхности почвы относится к показателям, по которым на основе метеорологических данных оценивается биоклиматический индекс, определяющий комфортность климата [1]. Одна из ключевых научных задач состоит в установлении и формализации взаимосвязей между глобальными или региональными прогнозами климатических изменений и динамикой тепло- и влагообеспечения отдельных полей, при этом адаптация технологий возделывания сельскохозяйственных культур к микроклиматическим особенностям полей в агроландшафтах является одной из проблем как адаптивно-ландшафтного, так и точного земледелия [2]. Дистанционное зондирование Земли позволяет оценивать влажность почвогрунтов, а также уровень близко залегающих грунтовых вод [3]. Формирование температурных условий почвенного покрова определяется интенсивностью роста и развития растений, их высотой и сомкнутостью, определяющими величину их проективного покрытия [4]. Метеорологические исследования позволили составить классификацию термического состояния почв, основанную на среднемесячной наименьшей температуре в годовом цикле на стандартных глубинах измерения [5]. Также отмечается, что водопотребление почвы и транспирация растения коррелируют с температурой воздуха [6]. Отмечается, что регулируемый дефицитный полив и частичное высушивание корневой зоны сельскохозяйственных растений относятся к способам осуществления дефицитного орошения в условиях аридизации климата, когда необходимо обеспечить баланс между фотосинтезом и транспирацией [7]. Высокую эффективность в увлажнении почвы при выращивании саженцев плодовых деревьев играет капельное орошение, реализуемое с мая по август, за счет интенсивной транспирации и водопотребления, а также снижения испаряемости за счет затенения контуров поверхностного увлажнения [8]. Эффективным теплофизическим мелиорантом, улучшающим физико-химические условия выращивания яровой пшеницы на дерново-подзолистых почвах, является

биоуголь. Установлено, что теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность почв, а также температура подстилающей поверхности могут изменяться путем добавления биоугля за счет возрастания турбулентного потока тепла [9].

Действие температурного фактора на продуктивность культур, таких как хлопчатник, оказывает существенное влияние, особенно в генеративную фазу развития, такую как развитие пыльцы [10]. Исследования выяснили, что пространственная изменчивость таких характеристик, как влажность и плотность почвы, значительно влияет на теплопроводность почвенных слоев, являясь ключевой причиной неоднородности температурного режима. Рельеф местности, микрорельеф и направление склона также существенно влияют на перераспределение влаги, неоднородность уплотнения и, соответственно, неравномерное прогревание верхних слоев почвы [11].

Задача определения теплопроводных и температуропроводных свойств каштановых почв методом тепловой мелиорации эффективно решается в случаях, когда испарение с поверхности почвы отсутствует, вызывает отрицательный термический эффект. На открытых участках почв Волгоградской области в межполосной зоне облесенных полей, благодаря повышенной теплоемкости, грунт прогревается сильнее, чем на участках без лесных полос [12]. Сочетание наземного автоматизированного мониторинга почв и данных космического мониторинга позволяет исследовать температурные и термодинамические свойства почв и почвообразовательных процессов [13]. Сочетание этих технологий с интернет вещей (IoT) позволяет получать и анализировать информацию о характеристиках поля, процессах распределения теплопроводности и влажности почвы, что имеет важное значение для планирования более эффективной ирригации и прогнозирования урожая [14].

Температурный режим почв – важнейший фактор функционирования агроэкосистем, определяющий интенсивность множества процессов в почвах. Исследования, основанные на количественных оценках интенсивности внутрипочвенных процессов при разных температурах, становятся все более актуальными в различных сферах, особенно для прогнозирования развития эрозионных процессов и регулирования продуктивности сельскохозяйственных экосистем.

Цель исследования – изучение пространственного распределения поверхностной температуры поля на сельскохозяйственных территориях, отличающихся по засушливости методом дистанционного зондирования. Для достижения поставленной цели авторами решены следующие задачи:

а) мультисканальные космоснимки муниципальных образований Саратовской области обработаны с целью извлечения канала B10 в дальнем ИК-диапазоне (10,60–11,19 мкм) для определения величины поверхностной температуры (LST), а также извлечения ближнего и коротковолнового каналов B5 и B6 для расчета индекса NDMI;

б) построены картограммы распределения поверхностной температуры на сельскохозяйственных территориях данных муниципальных образований;

в) проведен корреляционный анализ между значениями средними температуры поверхности поля LST и величиной NDMI.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись почвы полей, расположенных в правобережье и левобережье Саратовской области, в районах, различающихся по аридности: Вольском, Базарно-Карабулакском, Аткарском, Турковском, Краснопартизанском, Саратовском, Энгельском, Марксовском, Федоровском, Новоузенском. Данные о влажности почвы и о значениях вегетационных индексов относились к периоду 01.07.2024 – 01.08.2024.

В качестве исходных материалов для задач дистанционного зондирования авторами применялись мультисканальные снимки, полученные спутником Landsat 8. Обработка данных SRTM и картографирование полученного материала проводились с помощью программного комплекса QGIS (версия 3.28.0). При этом выбрана географическая система координат WGS 84 EPSG 4326. Статистическая обработка полученных данных реализована в программном комплексе Statistica (версия 10). Для уточнения пространственного разрешения и повышения точности интерпретации данных была применена методика пан-шарпинга, что позволило объединить изображения с различным пространственным разрешением. В частности, для Landsat 8 использовали комбинацию панхроматического канала с пространственным разрешением 15 м и мультиспектральных каналов с разрешением 30 м для получения изображений высокого качества. Это улучшило детализацию и позволило

более точно определить границы объектов на местности [15]. Каналы B10 мультисканальных снимков были обработаны с помощью модуля RS&GIS в программном комплексе QGIS. Обнаружена выраженная инфракрасная компонента в спектрах отражения сельскохозяйственных территорий (рис. 1).

Для оценки уровня аридности территории авторами применялся стандартизованный индекс различий увлажненности (NDMI). Его величина характеризует уровень влажности в растительности и применяется для оценки аридности и почвенного газообмена. Индекс NDMI определяется в соответствии с формулой

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

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

Этот индекс показывает различия в увлажненности, обладает высокой чувствительностью к структуре растительного покрова, поскольку позволяет оценивать содержание влаги на нескольких уровнях растительности, в отличие от других индексов, которые измеряют влагу лишь в верхнем слое. Повышение засушливости вызывает снижение доли NIR-компоненты и увеличение доли SWIR-компоненты в спектре отражения растений. Это объясняется разными характеристиками отражения растительности и почвы. Снижение значений NDMI свидетельствует о возрастании аридности региона. Чтобы определить NDMI, использовалась классификация спектральных данных изображения с последующим преобразованием в shp-файл, который наиболее удобен для ГИС-анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

Понижение индекса NDMI соответствует увеличению аридности климата. Авторами установлено (таблица), что аридность районов Саратовской области увеличивается при переходе с севера на юг области в следующем порядке: Вольский, Базарно-Карабулакский, Аткарский, Турковский, Краснопартизанский, Саратовский, Энгельский, Марксовский, Федоровский, Новоузенский районы. В этом же направлении возрастает величина средней температуры поверхности земли (таблица).

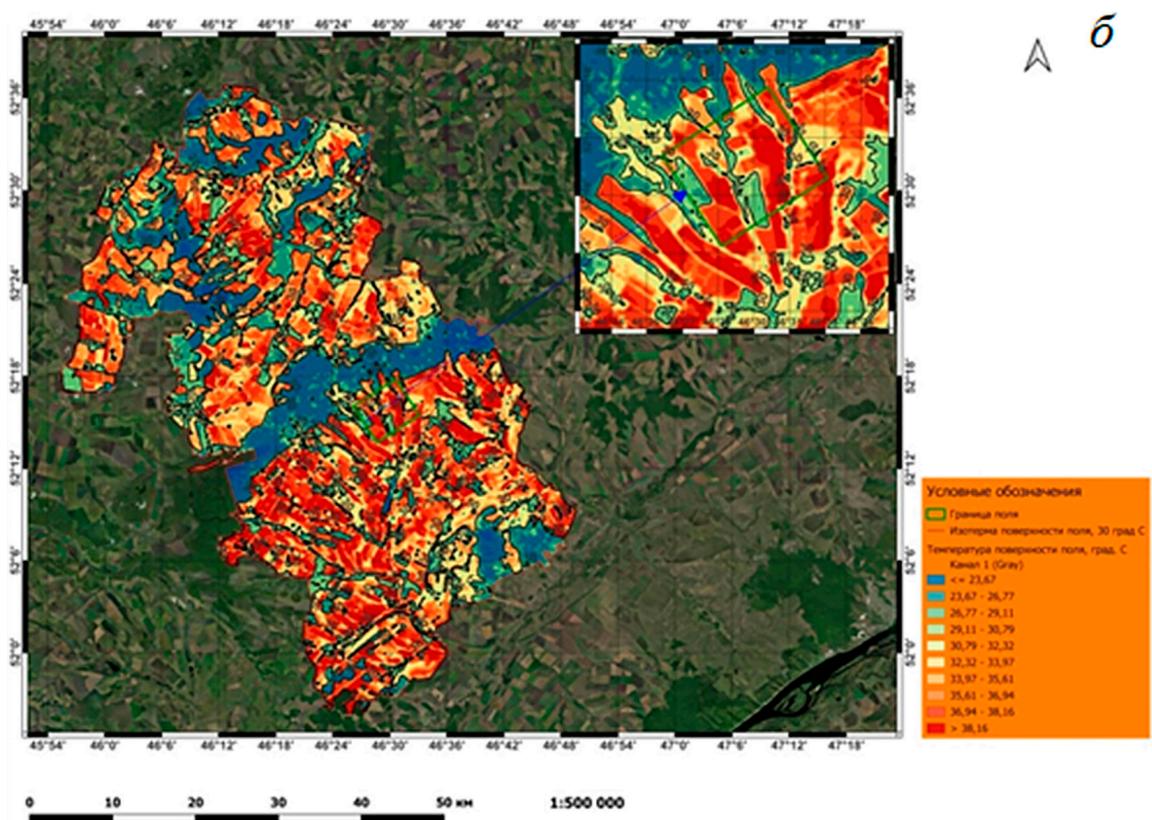
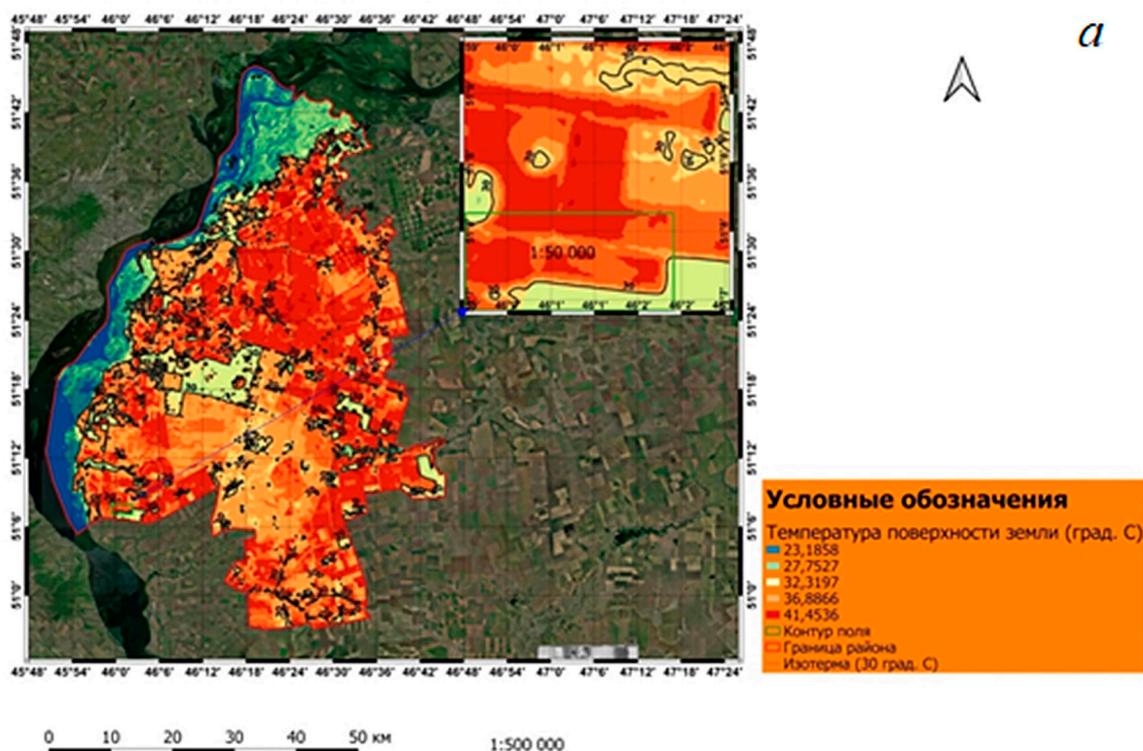


Рис. 1. Картограмма распределения температуры поверхности почвы по районам и расположенным на них сельскохозяйственным угодьям (а – Энгельсский район, б – Базарно-Карабулакский район)

Значения индекса NDMI и температуры поверхности земли (LST) сельскохозяйственных полей, расположенных в районах Саратовской области, различающихся по аридности

Район	NDMI	LST, °C
Вольский	-0,0412	18,54
Базарно-Карабулакский	-0,0598	17,81
Аткарский	-0,0622	19,28
Турковский	-0,0527	26,32
Краснопартизанский	-0,0466	22,18
Саратовский	-0,0717	29,25
Энгельский	-0,0729	32,83
Марковский	-0,0771	34,56
Федоровский	-0,0812	30,05
Новоузенский	-0,0834	36,20

Данный факт может объясняться несколькими причинами. Во-первых, это снижение почвенной влаги. В условиях аридного климата уровень осадков значительно уменьшается. Почва теряет влагу, и уменьшается процесс испарения воды с ее поверхности и с поверхности растений вследствие транспирации. Испарение и транспирация обычно потребляют значительное количество энергии, охлаждая поверхность. При их уменьшении больше солнечной энергии переходит в тепловую, что повышает температуру поверхности.

Во-вторых, возрастание температуры почвы в условиях увеличения аридности климата объясняется снижением фитомассы. В аридных условиях растения страдают от недостатка влаги и зачастую погибают или существенно уменьшают свою биомассу. Растения обладают способностью охлаждать поверхность через транспирацию. Меньше растительности – меньше охлаждения, и, как следствие, температура поверхности растет.

В-третьих, данный факт может объясняться изменением теплоемкости и теплопроводности почвы. Влажная почва имеет более высокую теплоемкость и теплопроводность по сравнению с сухой почвой. Сухая почва нагревается быстрее и до более высоких температур, так как ее теплоемкость и способность поглощать и удерживать тепло ниже.

В-четвертых, причиной такого распределения температуры поверхности почвы являются альbedo и радиационный баланс. Влажная почва и зеленые растения обычно имеют более высокое альbedo, что позволяет отражать больше солнечной энергии. По мере высыхания и деградации расти-

тельного покрова альbedo снижается, поверхность поглощает больше солнечной энергии и, соответственно, нагревается.

Все эти факторы в совокупности способствуют тому, что с ростом аридности климата температура поверхности сельскохозяйственных полей увеличивается, что создает дополнительные сложности для ведения сельского хозяйства в таких зонах.

Авторами установлено, что температура поверхности земли LST распределяется по территории рассматриваемых территорий неравномерно (рис. 1). Это может объясняться рядом причин. Одной из них является полив и удобрение почв, влияющие на микроклимат. Другим фактором является рельеф, небольшие изменения которого влияют на распределение температуры. Возвышенности могут получать больше солнечного излучения, тогда как низины могут быть затененными и, возможно, собирать холодный воздух, что ведет к более низким температурам. Также разные виды культур могут по-разному влиять на температуру поверхности. Высокие и густые растения могут создавать тень, снижающую температуру почвы под ними, тогда как поля с редкими или молодыми посадками быстрее нагреваются.

Например, полив может повысить влажность и изменить тепловой баланс, а обработка почвы может изменить ее структуру и, соответственно, теплообмен. На распределение температуры по поверхности территории влияет солнечная инсоляция и движение воздушных масс. Различные участки поля могут получать неодинаковое количество солнечного света в течение дня из-за ориентации к солнцу и угла солнечных лучей. Это особенно заметно в полях с наклоном к северу или югу. При этом поля, открытые к преобладающим ветрам, могут быть более охлажденными за счет постоянного воздухообмена. Эти факторы не действуют изолированно, а чаще всего взаимодействуют между собой, создавая сложную мозаичную картину температурного распределения на поле.

Авторами обнаружена корреляционная зависимость между величиной температуры поверхности агроценоза LST и индексом NDMI. При этом взаимосвязь между LST и NDMI соответствовала критерию нормального распределения: почти все точки корреляционной зависимости точек находятся в области между аппроксимирующей прямой и асимптотами, отвечающими границам области гауссова распределения (рис. 2).

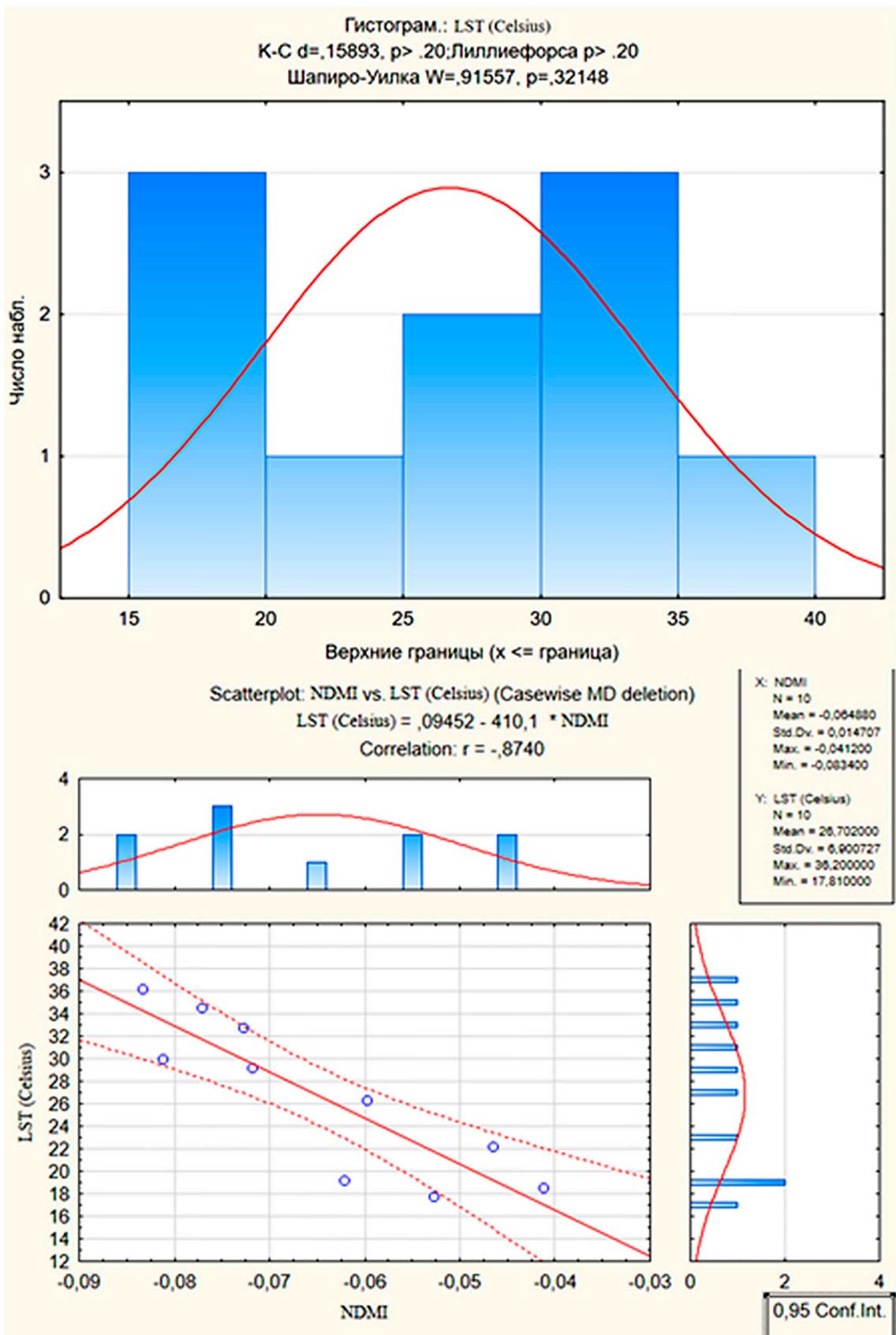


Рис. 2. Распределение температуры LST по значениям индекса NDMI по гауссовой модели

		Correlations (Soil Temperature-NDMI. Saratov_region.sta)			
		Marked correlations are significant at $p < ,05000$			
		N=10 (Casewise deletion of missing data) CumulativePe			
Variable		Means	Std.Dev.	LST (Celsius)	NDMI
LST (Celsius)		26,70200	6,900727	1,000000	-0,874042
NDMI		-0,06488	0,014707	-0,874042	1,000000

		Spearman Rank Order Correlations (Soil Temperature-NDMI. Saratov_region.sta)			
		MD pairwise deleted			
		Marked correlations are significant at $p < ,05000$			
Pair of Variables		Valid N	Spearman R	t(N-2)	p-value
LST (Celsius) & NDMI		10	-0,878788	-5,20855	0,000814

Рис. 3. Матрица парной корреляции и значение параметров в корреляционной модели Спирмена между величинами LST и NDMI

Это свидетельствует о том, что значения LST, распределенные относительно индекса засушливости NDMI, удаленные от своего среднего значения, встречаются реже, чем близкие к нему. Дополнительно оценка корреляционных взаимосвязей между данными характеристиками оценивалась с помощью критерия Спирмена. При этом производилась оценка коэффициента корреляции Спирмена R, а также коэффициент Стьюдента и величины p, представляющей собой вероятность нулевой гипотезы, то есть предположения о получении текущего результата при равенстве нулю коэффициента корреляции. Для всей рассмотренной зависимости наблюдалось выполнение соотношений

$$p < p_{кр} \text{ и } t(N-2) > t_{кр}(N-2),$$

где N – число точек в корреляционной зависимости.

Таким образом, значения характеристик корреляционной взаимосвязи являются статистически значимыми (выделены красным цветом), и нулевая гипотеза о равенстве нулю коэффициента корреляции отвергается (рис. 3).

Проведенный корреляционный анализ позволил установить, что значения температуры поверхности LST связаны между собой сильной (коэффициент корреляции $r = -0,8740$) отрицательной корреляционной линейной взаимосвязью:

$$LST = 0,9452 - 410,1NDMI. \quad (2)$$

Таким образом, чем ниже значение индекса NDMI (и выше засушливость территории), тем выше температура LST поверхности земли сельскохозяйственного угодья.

Заключение

Установлено, что аридность районов Саратовской области увеличивается при переходе с севера на юг области в следующем порядке: Вольский, Базарно-Карабулакский, Аткарский, Турковский, Краснопартизанский, Саратовский, Энгельский, Марковский, Федоровский, Новоузенский районы. В этом же направлении возрастает величина средней температуры поверхности земли. Неоднородный характер распределения температуры поверхности по территории сельскохозяйственных угодий может объясняться поливом и удобрением почв, структурой рельефа, типом и плотностью произрастающих культур. Поверхностная температура LST сельскохозяйственных угодий линейно снижается с увеличением стандартизованного индекса различий увлажненности NDMI.

Список литературы

- Семенова А.А., Салтыкова М.М., Банченко А.Д. Региональные особенности динамики показателей теплового комфорта на фоне изменения климата // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 1 (391). С. 152–170.
- Рухович О.В., Шкуркин С.И. Прогнозные оценки урожайности озимой пшеницы с учетом рельефа, климата и гранулометрического состава почвы // Плодородие. 2021. № 6 (123). С. 3–5.
- Мкртчян Ф.А. Физические основы дистанционного мониторинга земных покровов и водных систем // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2023. № 9. С. 91–107.
- Емельянов Д.В., Ботвич И.Ю., Мальчиков Н.О., Шевыринов А.П. Оценка динамики температур сельскохозяйственных объектов по данным беспилотных воздушных судов // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2020. № 13 (6). С. 757–765. DOI: 10.17516/1999-494X-0264.
- Балыбина А.С., Трофимова И.Е. Подходы к картографированию термического режима почв в условиях контраст-

- ного рельефа Забайкалья // Геодезия и картография. 2022. Т. 83, № 10. С. 20–28.
6. Романов И.А., Лихацевич А.П., Латушкина Г.В. Влияние способа определения биотермических коэффициентов водопотребления растений на точность расчета водного баланса почвы // Мелиорация. 2021. № 1 (95). С. 5–18.
7. Федосов А.Ю., Меньших А.М., Иванова М.И. Дефицитное орошение овощных культур // Овощи России. 2022. № 3. С. 44–49.
8. Дубенок Н.Н., Шумакова К.Б., Гемонов А.В., Лебедев А.В., Калинин Р.В. Влияние режимов капельного орошения на водопотребление саженцев сливы в питомнике на дерново-подзолистых почвах // Мелиорация и водное хозяйство. 2021. № 3. С. 19–26.
9. Доброхотов А.В., Козырева Л.В. Влияния внесения биоугля на теплофизические свойства дерново-подзолистой почвы и составляющие энергетического баланса яровой пшеницы в Ленинградской области при различных условиях почвенного увлажнения // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2023. № 116. С. 43–75.
10. Сафарова С.С., Мавлонов З. Влияние режимов пред-поливной влажности почвы на показатели градиентов температуры и влажности воздуха хлопкового поля в условиях Вахшской долины // Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. Серия естественных наук. 2020. № 2–3 (78). С. 79–83.
11. Шапорина Н.А., Сайб Е.А. Пространственное распределение температуры почв в комплексном почвенном покрове Предсаярия // Почвы и окружающая среда. 2021. Т. 4, № 2. URL: <https://soils-journal.ru/index.php/POS/article/view/146> (дата обращения: 10.08.2024). DOI: 10.31251/pos.v4i2.146.
12. Рулев А.С., Рулева О.В. Теплофизические свойства почв Волгоградской области // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2022. Т. 14, № 5. С. 337–348.
13. Кудряшова С.Я., Чумбаев А.С., Курбатская С.С. Картографические модели температурных полей почв степных котловин Хакасии и Тывы на основе совместного анализа наземных и спутниковых данных // Почвы и окружающая среда. 2024. Т. 7, № 1. URL: <https://soils-journal.ru/index.php/POS/article/view/240> (дата обращения: 11.08.2024).
14. Андрияшечкина Н.А., Мусихина Л.В. Интернет вещей в сельском хозяйстве // Научно-технический вестник: Технические системы в АПК. 2020. № 1 (6). С. 42–47.
15. USGS. Science for changing world. [Электронный ресурс]. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 11.08.2024).