

СТАТЬИ

УДК 631.92:633

DOI 10.17513/use.38299

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ ПОЛЯ
ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ****Косарев А.В., Русинов А.В., Чумакова С.В.,
Колганов Д.А., Алексеев В.С., Моршнева А.Ю.***ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики,
биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова», Саратов,
e-mail: aleteia@inbox.ru, rusinovsar@yandex.ru, ch-sv@yandex.ru,
dmi.kolg@mail.ru, alekseevlad1997@gmail.com, morshnev199@mail.ru*

Целью работы являлось изучение пространственного распределения объемной влажности поля методом дистанционного зондирования Земли. Материалом исследований явились спутниковые космоснимки Landsat_8_9, на основе которых были построены карты распределения вегетационных индексов, а также распределение объемной влажности поля. В качестве объекта исследования было выбрано поле вблизи пос. Степное левобережья Саратовской области. Обработка матрицы высот и картографирование полученного материала проводились с помощью кроссплатформенной программной системы QGIS. Были изучены особенности распределения нормализованного вегетационного индекса растительности, нормализованного разностного индекса, почвенно-скорректированного вегетационного индекса. Регрессионный анализ зависимости объемной влажности от величины нормализованного вегетационного индекса растительности позволил построить картограмму распределения влажности за период с 2022 по 2024 г. В 2022–2023 гг. нормализованный относительный индекс растительности показывал высокий уровень активности растительного покрова благодаря благоприятным погодным условиям, достаточным осадкам и питательным веществам в почве. В 2024 г. значения нормализованного вегетационного индекса растительности снизились до отрицательных, что связано с понижением среднесуточной температуры во время сева. Значения почвенно-скорректированного вегетационного индекса для Саратовского Заволжья за исследуемый период снижались за счет проводимых агротехнических мероприятий. Влажность почвы за наблюдаемый период имеет тенденцию к возрастанию.

Ключевые слова: вегетационные индексы, влажность почвы, поле, агротехника**DISTRIBUTION OF SOIL MOISTURE IN THE FIELD ACCORDING
TO REMOTE SENSING DATA****Kosarev A.V., Rusinov A.V., Chumakova S.V.,
Kolganov D.A., Alekseev V.S., Morshnev A.Yu.***Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering
named after N.I. Vavilov, Saratov,
e-mail: aleteia@inbox.ru, rusinovsar@yandex.ru, ch-sv@yandex.ru,
dmi.kolg@mail.ru, alekseevlad1997@gmail.com, morshnev199@mail.ru*

The purpose of the work was to study the spatial distribution of the volumetric humidity of the field by remote sensing of the Earth. Materials and methods of research. The material of the research was satellite images of Landsat 8_9, on the basis of which maps of the distribution of vegetation indices, as well as the distribution of the volume moisture of the field, were constructed. The field near the village of Stepnoye on the left bank of the Saratov region was chosen as the object of the study. The elevation matrix was processed, and the resulting material was mapped using the cross-platform QGIS software system. Results and discussion. The features of the distribution of the normalized vegetation index, the normalized difference index, and the soil-adjusted vegetation index were studied. Regression analysis of the dependence of volume humidity on the value of the normalized vegetation index made it possible to build a cartogram of humidity distribution for the period from 2022 to 2024. In 2022–2023, the normalized relative vegetation index showed a high level of vegetation cover activity due to favorable weather conditions, sufficient precipitation and nutrients in the soil. The values of the normalized vegetation index decreased to negative in 2024, which is due to a decrease in the average daily temperature during sowing. The values of the soil-adjusted vegetation index for the Saratov Trans-Volga region for the period under study decreased due to the agrotechnical measures taken. Soil moisture for the observed period tends to increase.

Keywords: vegetation indices, soil moisture, field, agricultural technology**Введение**

Обеспечение и контроль необходимого уровня влажности почвы, особенно на засушливых территориях, является в настоящее время одной из актуальных задач агротехники и агротехнологии. Контроль уров-

ня влажности может осуществляться как *in situ*, с помощью датчиков, так и с помощью дистанционных технологий, к которым относятся дистанционные методы мониторинга агроэкосистем. Исследованию дистанционного зондирования Земли как способа

оценки влажности на основе моделей взаимодействия земной поверхности с атмосферой посвящено значительное количество работ [1]. С использованием различных методов дистанционного зондирования можно получить информацию о влажности поверхности земли в различных географических областях. Для измерения влажности почвы обычно применяют микроволновые радиометры, так как на частоте $f = 1-2$ ГГц имеется сильная связь между влажностью почвы на глубине 5 см и яркостной температурой. Также оценку влажности почвы можно провести с помощью дистанционного зондирования на видимом/инфракрасном спектре путем измерения вегетационного индекса NDVI на видимом/ближнем инфракрасном диапазоне и поверхностной температуры почвы (t_{st}) в термальном диапазоне [2]. Известна бистатическая схема дистанционной оценки влажности с помощью измерения коэффициента отражения в свободном пространстве на фиксированном угле зондирования [3]. Данный метод позволяет оценивать влажность почвы в толщине до 5 см. Важной задачей при этом является обеспечение процедуры компенсации отражения сигнала от водяных паров атмосферы, которая может быть проведена на основе зависимости спектра отражения от влажности [4]. Гиперспектральные и мультиспектральные космоснимки, на основе которых производится оценка влажности полей, являются одним из важнейших источников данных в точном земледелии [5]. Предлагается способ определения влажности грунта через использование метода пространственной интерполяции известных данных, полученных из космических снимков [6]. Эти данные могут быть обработаны путем линейной корреляции спутниковых данных с наземными наблюдениями в отдельных точках с известными координатами. Микроволновой диапазон применяется не только для оценки уровня влажности почв, но и для отслеживания ее сезонной динамики [7]. Методы дистанционного зондирования, такие как тепловые, оптические, активные и пассивные микроволновые измерения, позволяют осуществлять точные исследования в области оценки влажности почвы и ее урожайности [8]. В течение последних нескольких десятилетий использование космического зондирования для измерения влажности почвы, включая зондирование в различных диапазонах электромагнитных волн, таких как видимый свет, инфракрасный свет, тепловое излучение, микроволны

и другие, стало все более популярным [9]. Отмечается вклад почвенного органического углерода в формирование влажности почвы и проводится коррекция спектрального отклика в гиперспектральном дистанционном зондировании почвенной влаги [10]. Известен метод дистанционной оценки влажности почвы, как DL-MME, сочетающий технологию синтетической апертуры, использующей радиолокационные сигналы (SAR) и оптические методы, реализованные на базе Sentinel_1 и Sentinel_2. Его преимуществами перед имеющимися являются устойчивость к выбору модели и устойчивость к калибровке модели в течение вегетационного периода [11]. Получение точной информации о содержании органических веществ в почве становится все важнее из-за изменений окружающей среды. Модель нового байесовского подхода к выводу, называемого интегрированной вложенной аппроксимацией Лапласа со стохастическим дифференциальным уравнением в частных производных (INLA-SPDE), может использоваться для картирования почвы, основанного на индексах влажности почвы и вегетационных индексах [12]. Дистанционное зондирование помогает получить данные об индексах влажности почвы. В исследовании показано, что использование INLA-SPDE с индексами влажности почвы и переменными FTD обеспечивает более точное картографирование почвы, чем случайный лес. В результате точность картографирования повысилась на 25% с использованием оптимальной комбинации ковариант [13].

Таким образом, сочетание данных из микроволновых радиометров, видимого/инфракрасного спектра и термального диапазона позволяет получить полную картину влажности почвы в определенной географической области. Эти методы дистанционного зондирования являются эффективными инструментами для мониторинга влажности почвы на больших территориях, таких как сельскохозяйственные угодья или лесные массивы. Кроме того, данные о влажности почвы, полученные с помощью дистанционного зондирования, могут быть использованы для прогнозирования урожайности и оптимизации земледелия. Анализ изменений влажности почвы в течение времени позволяет выявить тенденции и понять динамику ее изменений в различных климатических условиях. Важно отметить, что применение методов дистанционного зондирования для измерения влажности по-

чвы требует высокой точности калибровки и валидации данных, чтобы обеспечить достоверность результатов. Также необходимо учитывать различные факторы, такие как тип почвы, рельеф местности и климатические условия, которые могут повлиять на интерпретацию полученных данных.

В целом использование различных методов дистанционного зондирования для оценки влажности почвы поможет в улучшении понимания процессов, происходящих на поверхности земли, и способствует развитию современных методов агрономии и экологии.

Цель исследования – изучение пространственного распределения объемной влажности поля методом дистанционного зондирования Земли. Для достижения поставленной цели авторами решены следующие задачи:

а) измерены значения влажности почвы в отдельных точках поля;

б) изучено распределение нормализованного вегетационного индекса растительности (NDVI), нормализованного разностного индекса (NDMI), почвенно-скорректированного вегетационного индекса (SAVI) на территории поля;

в) построена картограмма распределения влажности на территории поля.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись каштановые почвы поля в окрестностях пос. Степное, расположенного в левобережье Саратовской области. Данные о влажности почвы и о значениях вегетационных индексов относились к 2022–2024 гг. Измерение влажности почвы в отдельных точках поля осуществлялось с помощью емкостного датчика CAPACITIVE Soil Moisture Sensor v1.2. Принцип действия датчика следующий. При изменении влажности почвы изменяется его емкостная проводимость. В зависимости от влажности среды, в которую погружены зонды датчика, выходное напряжение всегда будет изменяться в диапазоне от 1,36 (для почвы с влажностью 100%) до 2,75 В (для почвы с влажностью 0%). Потребляемый ток при этом будет всегда равен значению 5 мА. Данные передаются со всех датчиков на станцию, где подвергаются автоматизированной обработке.

В качестве исходных материалов для задач дистанционного зондирования авторами применялись мультисканальные снимки, полученные спутником Landsat 8. Обработка данных SRTM и картографиро-

вание 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 интерпретации полученных данных применялся метод одноканального псевдоцветного изображения [14].

Стандартизованный индекс различий увлажненности (NDMI) характеризует уровень влажности в растительности и применяется для оценки аридности и почвенного газообмена. Он 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 мультисканальной снимке.

Нормализованный относительный индекс растительности NDVI определяется в соответствии с формулой

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

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

Почвенный вегетационный индекс определяется в соответствии с формулой

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

где L – коэффициент облиствения, $L = [0; 1]$, $L = 0$ для наибольшего индекса облиствения, $L = 1$ для наименьшего, авторами применялось оптимальное значение $L = 0,5$. Данный индекс позволяет минимизировать влияние яркости почвы на отражательную способность растений [15].

Результаты исследования и их обсуждение

В 2022–2023 гг. значения индекса NDVI свидетельствовали о достаточно высокой активности растительности в окрестностях поселка. Это может быть связано с благоприятными погодными условиями, достаточным количеством осадков и питательных веществ в почве.

Однако в 2024 г. ситуация с индексом NDVI изменилась. Значения индекса снизились до отрицательных значений, что указывает на ухудшение условий для рас-

тельности. По всей видимости, сказался фактор понижения температуры, из-за которого пришлось перенести посевные мероприятия.

Такие изменения в значениях индекса NDVI важно отслеживать и анализировать, так как они могут давать ценную информацию о состоянии экосистемы и ее устойчивости к изменениям в окружающей среде. На основе этих данных можно принимать решения о необходимости охраны природы, устойчивого использования ресурсов и принятия мер для сохранения биоразнообразия (рис. 1).

Значения индекса NDMI находились в диапазонах: 0,007–0,391 – для 2022 г., (-0,189)–0,364 – для 2023 г., (-0,233–0,419) – для 2024 г. (рис. 2). Поведение индексов NDMI и вегетационных индексов можно объяснить через особенности физиологических процессов в растениях. Недостаток влаги приводит к снижению гидратации тканей, что неблагоприятно сказывается на показателях NDMI. В то же время индекс вегетации снижается менее значительно, так как растущие растения продолжают фотосинтез и сохраняют свою зеленую массу. Весенние месяцы, начало основного вегетационного периода озимой пшеницы, также сопровождаются заметными изменениями параметров NDMI и вегетационных индексов. Весенние засухи или нехватка осадков в первую очередь отражаются в индексе влажности NDMI, так как растения испытывают водный стресс и их способность к транспирации снижается.

Вегетационные индексы на начальном этапе остаются высокими, поскольку растения продолжают активно развиваться при наличии определенных запасов влаги в почве. Однако продолжительный недостаток влаги, типичный для засушливого Поволжья, приводит к снижению и вегетационных индексов, так как растения начинают терять зеленую массу, замедляя фотосинтез и другие метаболические процессы. Важным аспектом становится мониторинг параметров почвенной влаги и погодных условий, чтобы при необходимости проводить корректирующие агротехнические мероприятия, такие как орошение или внесение мульчи для сохранения влаги в почве.

Анализ временных рядов индексов NDMI и вегетационных индексов позволяет отслеживать текущее состояние посевов и прогнозировать возможные риски снижения урожайности. Современные методы дистанционного зондирования и анализа

больших данных обеспечивают более точное и своевременное принятие агротехнических решений, направленных на минимизацию негативных последствий дефицита влаги для сельскохозяйственных культур. Значения почвенно-скорректированного вегетационного индекса (SAVI) находились в диапазонах: 0,414–0,966 – для 2022 г., 0,119–0,964 – для 2023 г. (рис. 3).

Эти значения указывают на достаточное удержание влаги в почве для поддержания роста растительности. В 2024 г. значения SAVI резко упали до диапазона от -4.647 до -0.213 (рис. 3). Эти отрицательные значения индекса указывают на критическую ситуацию с растительностью и почвенной влагой.

Также этот факт может объясняться понижением среднесуточной температуры в начале июня. Такой диапазон значений может указывать на деградацию почв и снижение способности растительности удерживать влагу.

Синхронизация наблюдений за индексом SAVI с метеорологическими данными и информацией о состоянии водных ресурсов может дать более точное понимание причин изменений в состоянии растительности. Дополнительный анализ может также включать изучение различных агротехнических методов и их влияния на уровень влажности почвы. Эти меры могут помочь не только в идентификации причин изменений, но и в разработке стратегий для улучшения условий для растительности в будущем.

В конечном итоге регулярный мониторинг индекса SAVI и других связанных параметров играет важную роль в управлении земельными ресурсами и обеспечении устойчивого развития экосистем. В условиях изменения климата и непредсказуемых погодных условий важно применять комплексный подход для поддержания здорового состояния почвы и растительности, что, в свою очередь, способствует более стабильной экосистеме и снижает негативное воздействие на сельское хозяйство и общую экологическую ситуацию в регионе.

С помощью датчика влажности почвы CAPACITIVE Soil Moisture Sensor v1.2 были произведены замеры влажности почвы в шести точках поля, расстояние между которыми было 150–400 м. На основе этих данных было получено регрессионное соотношение между влажностью почвы h (об. %) и индексом NDVI:

$$h = 45,261e^{1,4485 \times \text{NDVI}} \quad (4)$$

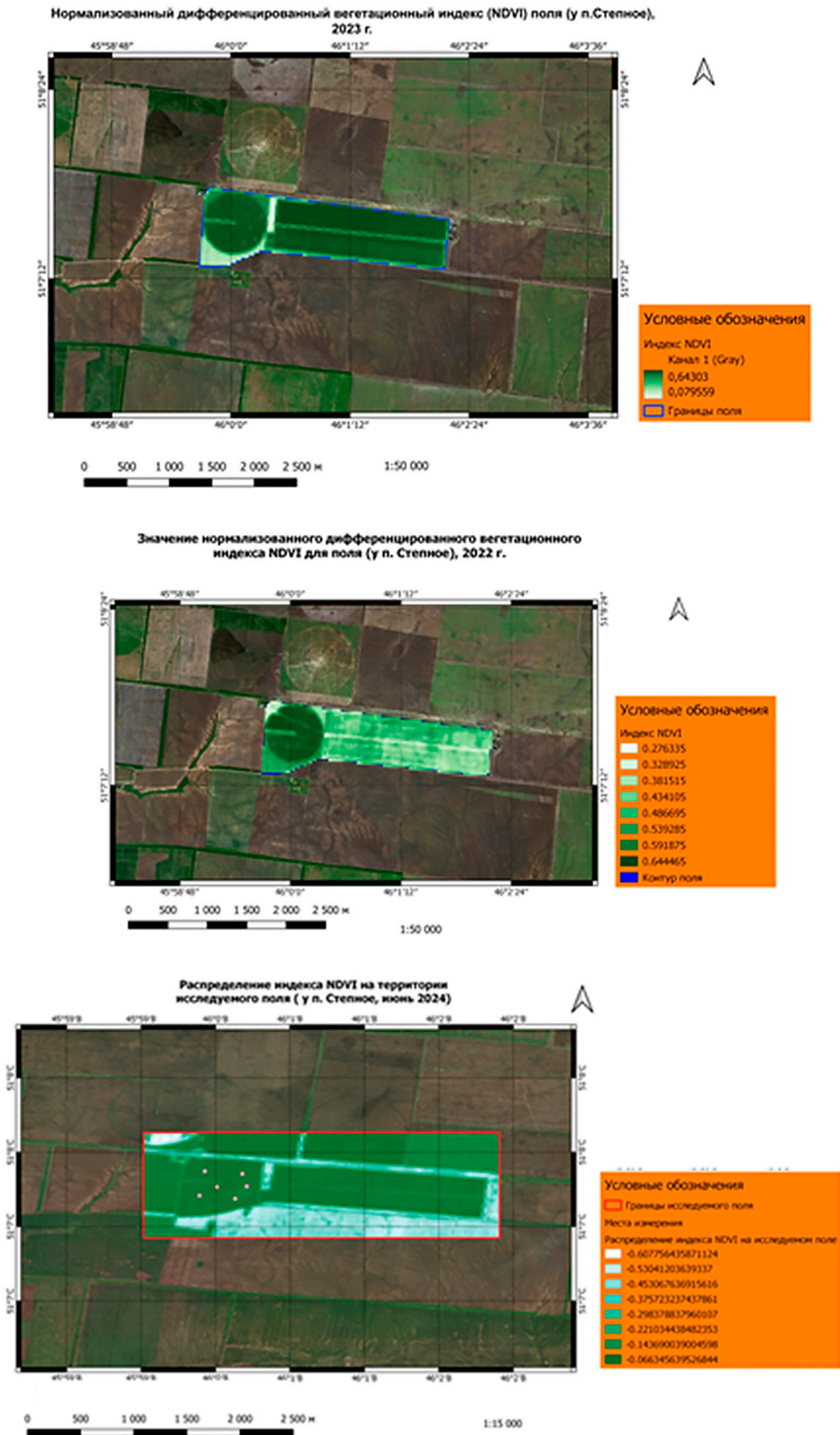
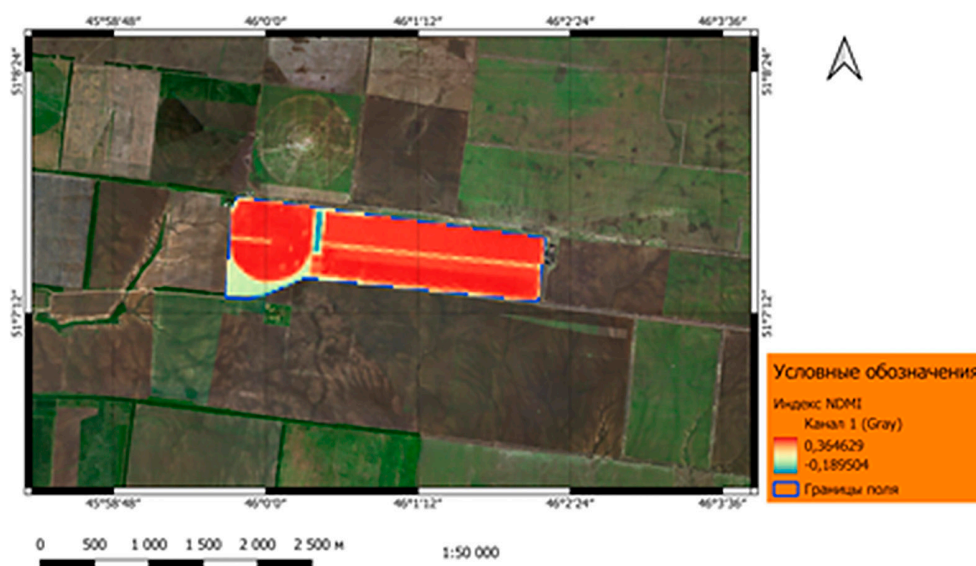
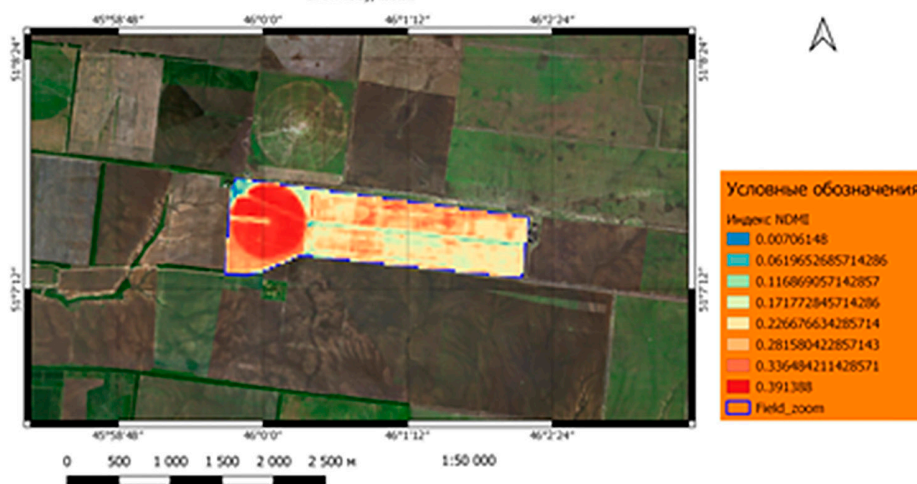


Рис. 1. Распределение индекса NDVI по территории изучаемого поля в 2022–2024 гг.

Нормализованный разностный индекс влажности (NDMI) поля (у п. Степное), 2023



Значения нормализованного разностного индекса влажности NDMI для поля (у п. Степное), 2022



Распределение индекса NDMI на территории исследуемого поля (у п. Степное, 2024)

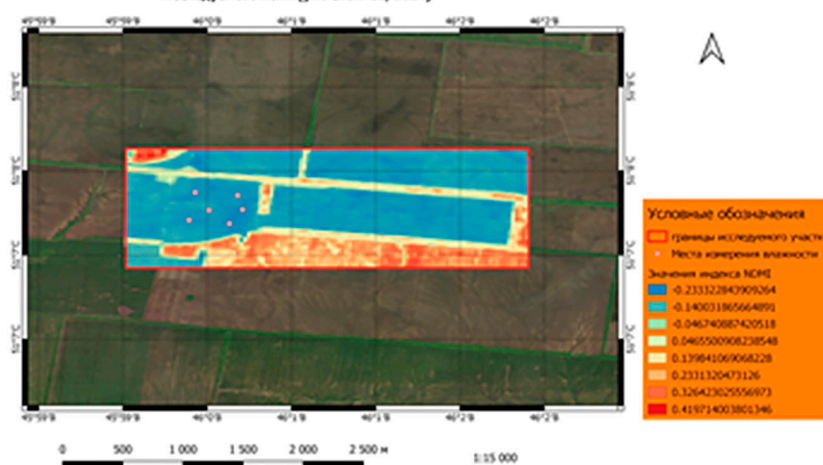


Рис. 2. Распределение индекса NDMI по территории изучаемого поля в 2022–2024 гг.

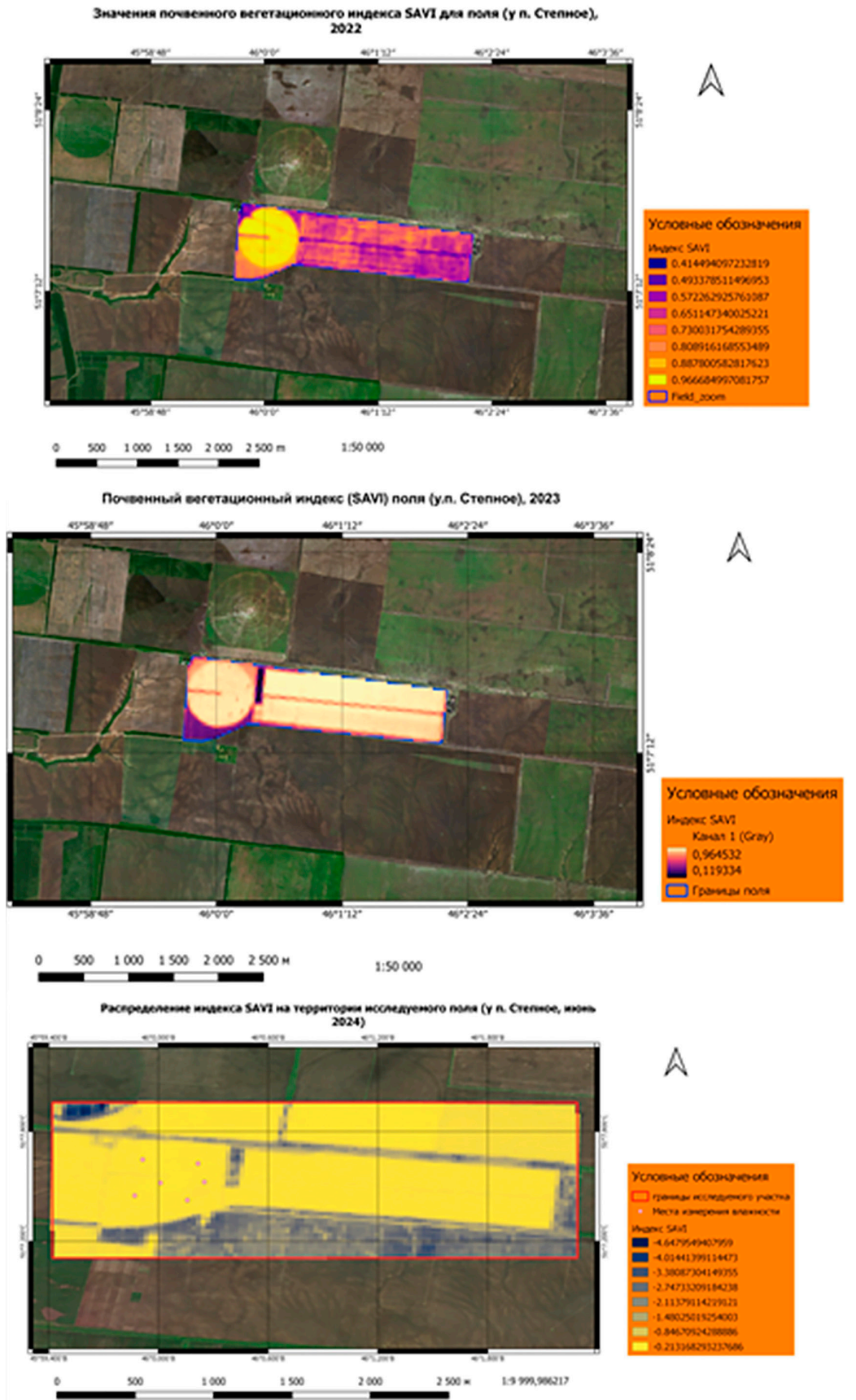


Рис. 3. Распределение индекса SAVI по территории изучаемого поля в 2022–2024 гг.

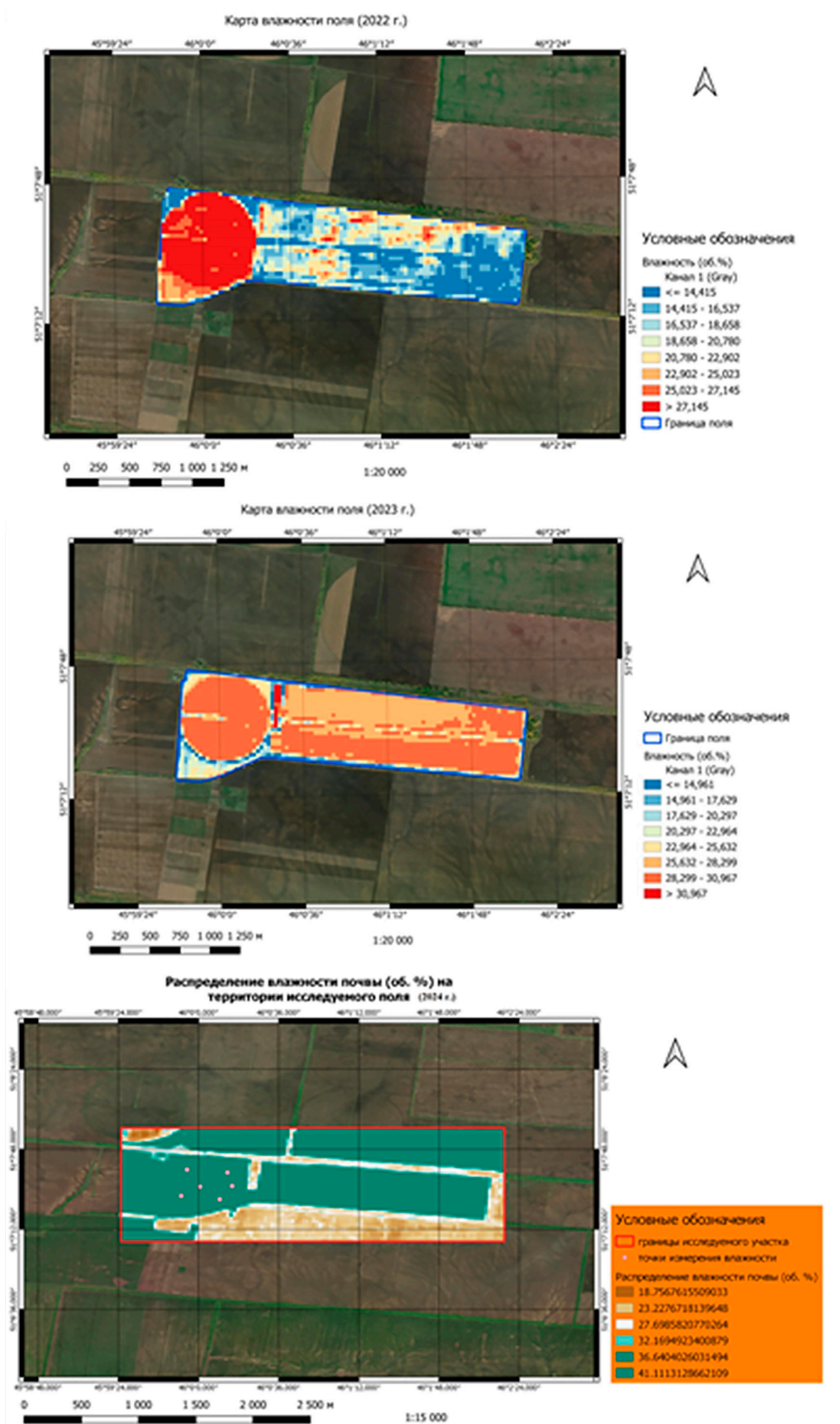


Рис. 4. Распределение влажности почвы (об. %) по территории изучаемого поля в 2022–2024 гг.

На его основе методом растровой алгебры рассчитан растр распределения влажности почвы по территории поля (рис. 4).

Результаты исследования, основанные на методах растровой алгебры, также указывают на значительное повышение уровня влажности почвы на протяжении наблюдаемых лет. В 2022 г. значения остановились в диапазоне 14,41–22,00%, в 2023 г. диапазон увеличился до 14,96–30,00%, а к 2024 г. достиг отметки 36,62–41,11%. Таким образом, можно утверждать, что проводимые мероприятия по управлению водными ресурсами обеспечили существенное улучшение условий для роста растений, что, в свою очередь, может способствовать повышению урожайности сельскохозяйственных культур на этом участке. Данная тенденция возрастания влажности почвы на территории поля свидетельствует о позитивном воздействии гидромелиоративных мероприятий, таких как создание систем капельного орошения, прокладка оросительных каналов и установка водозаборов. Эти меры способствуют равномерному распределению влаги по всей площади поля, что критически важно в условиях засушливого климата. Особенно заметным становится увеличение влажности в зоне, прилегающей к окружности, что можно объяснить концентрированным подведением воды в данное местоположение. Кроме того, полученные данные позволяют рассматривать данное поле как потенциальный пример для внедрения аналогичных гидромелиоративных технологий на других территориях с похожими климатическими условиями. Интенсивное увеличение показателей влажности почвы говорит о высокой эффективности применяемых методов.

Более высокое увлажнение почвы, особенно в периферийной зоне окружности, может также способствовать созданию микроклимата, способствующего более равномерному распределению влаги и предотвращению ее чрезмерной потери через испарение.

Следует отметить, что проводимые действия по улучшению водного баланса на поле не только поддерживают устойчивое аграрное производство, но и создают предпосылки для более продуманного и эффективного использования водных ресурсов. Успешное внедрение данных технологий фиксирует положительный опыт, который может быть использован в других агроклиматических зонах, испытывающих дефицит влаги. Важность продолжения аналитики и мониторинга изменений влажности по-

чвы на таких объектах играет ключевую роль в стратегическом управлении водными ресурсами на региональном уровне.

Выводы

1. В 2022–2023 гг. индекс NDVI показывал высокую активность растительного покрова, что связано с хорошими погодными условиями, достаточным количеством осадков и питательных веществ в почве. Растения были зелеными и густыми, указывая на хорошую урожайность и разнообразие видов. Однако в 2024 г. значения NDVI снизились до отрицательных, что сигнализирует об ухудшении условий для растительности. Это может быть следствием понижения среднесуточной температуры, совпавшего с началом сева.

2. В 2022–2024 гг. значения индекса NDMI варьировались следующим образом: 0,007–0,391 в 2022 г., (-0,189)–0,364 в 2023 г. и (-0,233)–0,419 в 2024 г. Колебания NDMI и вегетационных индексов объясняются физиологическими процессами в растениях. Недостаток влаги снижает гидратацию тканей и влияет на NDMI сильнее, чем на вегетационные индексы, все еще идет фотосинтез.

3. Значения SAVI для Саратовского Заволжья в разные годы следующие: 2022 г. – 0,414–0,966, 2023 г. – 0,119–0,964, 2024 г. – (-4,647)–(-0,213). В Саратовском Заволжье повышенный SAVI может указывать на сложные условия для растительности, вызванные аридизацией климата.

4. В 2022–2024 гг. значения индекса NDMI варьировались следующим образом: 0,007–0,391 в 2022 г., (-0,189)–0,364 в 2023 г. и (-0,233)–0,419 в 2024 г. Колебания NDMI и вегетационных индексов объясняются физиологическими процессами в растениях. Недостаток влаги снижает гидратацию тканей и влияет на NDMI сильнее, чем на вегетационные индексы, так как все еще идет фотосинтез.

5. Значения SAVI для Саратовского Заволжья в разные годы следующие: 2022 г. – 0,414–0,966, 2023 г. – 0,119–0,964, 2024 г. – (-4,647)–(-0,213). В Саратовском Заволжье повышенный SAVI может указывать на сложные условия для растительности, вызванные аридизацией климата.

6. Результаты исследования на основе метода растровой алгебры показывают увеличение влажности почвы за наблюдаемые годы. В 2022 г. значения влажности находились в пределах 14,41–22,00%, в 2023 г. – 14,96–30,00%, а в 2024 г. достигли 36,62–

41,11%. Это указывает на позитивное влияние мероприятий по управлению водными ресурсами, таких как капельное орошение, оросительные каналы и водозаборы, обеспечивающие равномерное распределение влаги на поле. Особенно заметно увеличение влажности в периферийной зоне, что связано с концентрированным подведением воды.

Таким образом, дальнейшие исследования в этом направлении важны и актуальны. Комплексное использование данных, таких как индекс SAVI наряду с другими показателями, позволит точнее выявлять проблемы и находить оптимальные решения, направленные на долгосрочное улучшение экологических и сельскохозяйственных условий в регионе.

Список литературы

- Музылев Е.Л. Использование данных дистанционного зондирования при моделировании водного и теплового режимов участков суши: обзор публикаций // *Водные ресурсы*. 2023. Т. 50, № 5. С. 561–584.
- Данзиев Р.М., Литвинов Н.Ю. Анализ неопределенности дистанционных оценок влажности почвы с целью достоверного предсказания наводнений // *Геодезия и картография*. 2017. Т. 78, № 11. С. 60–64.
- Музалевский К.В. Дистанционное измерение влажности в поверхностном слое минеральной почвы на двух частотах // *Журнал радиоэлектроники*. 2020. № 1. С. 1–23. [Электронный ресурс]. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan20/7/text.pdf> (дата обращения: 20.06.2024). DOI: 10.30898/1684-1719.2020.1.7
- Искендерзаде Э.Б., Асадов Х.Г., Алиева А.Д., Литвинов Н.Ю. Спектральный метод определения содержания влаги в почве // *Геодезия и картография*. 2022. Т. 83, № 8. С. 33–38.
- Шайтура С.В., Шайтура Н.С., Прудкий А.С., Кожев Ю.П., Феоктистова В.М. Использование дистанционного зондирования при мониторинге полей в точном земледелии // *Землеустройство, кадастр и мониторинг земель*. 2023. № 8. С. 485–492.
- Даргейко Л.Ф., Сахацкий А.И., Федоровский А.Д. Оценка влажности почвы по космическим снимкам дистанционного зондирования Земли на основе метода пространственной интерполяции Колмогорова // *Геоинформатика*. 2008. № 4. С. 49–51.
- Дагуров П.Н., Дмитриев А.В., Дымбрылов Ж.Б., Чимитдоржиев Т.Н. Влияние слоистой структуры влажности почвы на работу интерферометрических радиолокаторов с синтезированной апертурой // *Известия вузов. Физика*. 2012. Т. 55, № 8/2. С. 266–267.
- Akash M., Kumar P.M., Bhaskar P., Deepthi P.R., Sukhdev A. Review of estimation of soil moisture using active microwave remote sensing technique // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2024. Vol. 33. P. 101–118. DOI: 10.1016/j.rsase.2023.101118.
- Mohanty B.P., Mishra D., Sehgal V. Soil Moisture Remote Sensing: Satellite Retrieval, Geophysical Controls, and Applications // *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. 2024. DOI: 10.1016/B978-0-323-96026-7.00033-3.
- Jiang R., Sui Y., Zhang X., Lin N., Zheng X., Li B., Zhang L., Li X., Yu H. Estimation of soil organic carbon by combining hyperspectral and radar remote sensing to reduce coupling effects of soil surface moisture and roughness // *Geoderma*. 2024. Vol. 444. № 116874. DOI: 10.1016/j.geoderma.2024.116874.
- Sedighi A., Hamzeh S., Alavipanah S.K., Naseri A.A., Atkinson P.M. Ensembles of multiple models for soil moisture retrieval from remote sensing data over agricultural areas: A deep learning-based framework // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2024. Vol. 35. № 101243. DOI: 10.1016/j.rsase.2024.101243.
- Huang J., Malone B.P., Minasny B., McBratney A.B., Triantafyllis J. Evaluating a Bayesian modelling approach (INLA-SPDE) for environmental mapping // *Science of the Total Environment*. 2017. № 609. P. 621–632.
- Yang Ch., Yang L., Zhang L., Zhou Ch. Soil organic matter mapping using INLA-SPDE with remote sensing based soil moisture indices and Fourier transforms decomposed variables // *Geoderma*. 2023. Vol. 43. № 116571. DOI: 10.1016/j.geoderma.2023.116571.
- Буйлов В.Н., Косарев А.В., Чумакова С.В., Мавзовин В.С. Исследование влияния физико-климатических факторов Саратовской области на урожайность сои методом дистанционного зондирования Земли // *Успехи современного естествознания*. 2023. № 4. С. 7–14. DOI: 10.17513/use.38017.
- Badrul H.N.H., Hashim N., Saraf N.M., Talib N. Monitoring of rice growth phases using multi-temporal Sentinel-2 satellite image // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Т. 1051, № 1. 012021.