

Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университетінің Ғылым жаршысы: пәнаралық = Вестник науки Казахского агротехнического исследовательского университета имени Сакена Сейфуллина: междисциплинарный. – Астана: С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, 2024. - № 4 (123). - Р. 17-30. - ISSN 2710-3757, ISSN 2079-939X

[doi.org/10.51452/kazatu.2024.4\(123\).1788](https://doi.org/10.51452/kazatu.2024.4(123).1788)

УДК 504.453, 528.856

Исследовательская статья

Оценка возможностей дистанционного мониторинга влажности почв территории Северного Казахстана

Кабжанова Г.Р. , Рахимжанов Б.К. , Тулекулова Д.Т. 

АО НК «Қазақстан Ғарыш Сапары», Астана, Қазақстан

Автор-корреспондент: Кабжанова Г.Р.: gurashkab@mail.ru

Соавторы: (1: ДТ) d.tuleukulova@gmail.com; (2: РБ) b.rakhimzhanov@gharysh.kz

Получено: 10-10-2024 **Принято:** 18-12-2024 **Опубликовано:** 30-12-2024

Аннотация

Предпосылки и цель. Оценка предпосевного содержания влаги в посевном слое почвы необходима для эффективного управления сельскохозяйственным производством, особенно в зоне рискованного земледелия. Северный Казахстан является ключевым регионом для сельхозпроизводства в стране, и учитывая глобальные изменения климата, подверженность региона рискам в агропроизводстве (засуха, эрозия и др.), необходимо внедрение методов оперативной оценки условий и дистанционного мониторинга сельхозпроизводства.

Материалы и методы. Спутниковые данные использованы для оценки содержания влаги в почве и состояния растительности. Калибровка наземных данных проводилась путем отбора почвенных образцов для повышения точности спутниковых данных. Влажность почвы измерялась с помощью емкостного влагомера, основанного на измерении электропроводности, причем пробы отбирались в предпосевной период на всей территории Северного Казахстана, на глубине посевного слоя. Произведены расчеты запасов продуктивной влажности в почве с учетом объема и процентного содержания влаги. Эти наземные измерения послужили контрольными данными для калибровки спутниковых индикаторов. Откалиброванные данные позволили составить карту распределения влажности почвы, подчеркнув пространственную изменчивость влажности по региону.

Результаты. Спутниковый анализ с использованием данных дистанционного зондирования и наземных данных позволил выявить особенности пространственного распределения влажности почвы в регионе. Получены расчеты по сезонным колебаниям снежного покрова и его низкая плотность предполагает недостаточное накопление водных ресурсов в зимний период, что влияет на уровень продуктивной влажности почвы в весенний период на территории Северного Казахстана.

Заключение. Проведенное исследование демонстрирует, что методы оценки влажности почвы с использованием данных ДЗЗ и наземными измерениями являются эффективным инструментом для оперативного мониторинга состояния почв в Северном Казахстане. Комплексный анализ спектральных индексов (NDVI, NDWI, NDMI) и индексов дефицита воды (mCDI и SWE) выявил умеренный дефицит водных ресурсов. Данный дефицит требует адаптации аграрных практик для оптимального использования доступной влаги. На основе полученных данных рекомендуется внедрение влагосберегающих технологий, более точное планирование посевных циклов и адаптация агротехнологий к текущим гидрометеорологическим условиям, что позволит смягчить влияние дефицита воды и улучшить стабильность сельскохозяйственного производства в зоне рискованного земледелия.

Ключевые слова: влажность почвы; агропроизводство; дистанционное зондирование; геоинформационные системы.

Введение

В засушливых условиях Северного Казахстана на южных черноземах и каштановых почвах величина и стабильность урожая сельскохозяйственных культур определяется, в первую очередь, наличием почвенной влаги. Запасы продуктивной влаги в почве, как показатель доступной для растений влаги, прежде всего, необходимы для характеристики водообеспеченности растений, оценки их влияния на рост и транспирацию растений. Однако, данный переменный показатель трудно измерить в больших масштабах. В полевых условиях влажность почвы измеряется точечно, локально, по принятой шкале, имеются ограничения в учете пространственной изменчивости, требует больших трудозатрат и временных ресурсов. Альтернативой наземным методам оценки влажности почвы являются дистанционные методы оценки свойств почв. Данные методы имеют большой потенциал для характеристики текущих условий произрастания растений, прогнозирования урожайности и формирования трендов развития посевов.

Целью исследования является оценка влажности посевного слоя почв Северного Казахстана посредством дистанционных методов мониторинга.

Для достижения поставленной цели был проведен анализ подобных исследований в мире, проведен анализ данных дистанционного зондирования Земли (далее ДЗЗ) на период исследования, проведен полевой отбор почвенных образцов территории зоны интереса и оценка влажности посевного слоя, статистический анализ и оценка корреляционных зависимостей индексных величин данных ДЗЗ и значений влаги. Подход в сочетании оптического и инфракрасного излучения при дистанционном зондировании будет использован при оценке влажности почв с разрешением данных ДЗЗ, который вполне пригоден для оценки региональных масштабов. Дистанционный анализ влажности почв должен дать пространственную характеристику изменчивого параметра, который не стабилен во времени, а также зависит от типа почвы, рельефа, от типа землепользования.

Эффективное управление водными ресурсами в сельхозпроизводстве подразумевает мониторинг за влажностью почвы, особенно в предпосевной период, который является одним из важных исходных переменных при прогнозировании урожайности, оценке устойчивости земледелия региона.

Продуктивная влага – часть запасов влаги в почве, при поглощении которой растения не только поддерживают свою жизнедеятельность, но и синтезируют органическое вещество. В условиях Северного Казахстана термический режим территории не лимитирует рост и развитие зерновых культур. Определяющее значение в формировании продуктивности имеют атмосферные осадки, обеспечивающие создание запасов почвенной влаги и условия влагообеспеченности в период вегетации. Под водообеспеченностью понимают степень удовлетворения фактической их потребности в воде, т.е. отношение поступающего и имеющегося в почве запаса продуктивной влаги к количеству, необходимому для нормального развития культуры.

Высокий уровень агротехники и почвенного плодородия снижает его значение у разных культур на 25-40%.

Ресурсы почвенной влаги в предпосевной период в условиях северного Казахстана в основном зависят от количества осадков в осенне-зимний период. По мнению ученых, осенне-зимние осадки хорошо сохраняются в почве и являются резервным фондом на случай атмосферных засух для всех зерновых культур [1]. Результаты определения глубины промачивания дают ориентировочное представление о запасах продуктивной влаги в почве, перед посевом в зависимости от предшественника, приёма осенней обработки почвы, экспозиции поля. Полученная информация позволяет вносить необходимые коррективы в элементы весенней агротехники полевых культур и судить о величине ожидаемого минимума урожайности в случае засухи.

В сельскохозяйственном производстве большое значение имеет окупаемость каждого миллиметра израсходованной растениями влаги в период вегетации. По данным исследований, в условиях сухостепной зоны Северного Казахстана на 1 ц зерна расходуется 7,1 мм почвенной влаги и 8,2 мм влаги летних осадков. При этом 1 мм почвенной влаги формирует 14 кг зерна, а 1 мм летних осадков – 12,2 кг [2].

Современное сельское хозяйство все чаще сталкивается с различными проблемами мониторинга посевов. Наиболее эффективным и надежным методом ведения постоянного

сельскохозяйственного мониторинга является использование средств и методов ДЗЗ. Данные, полученные этим методом, обладают рядом преимуществ по сравнению с другими, позволяя вести регулярное наблюдение и контроль над различными этапами сельскохозяйственных работ, стадиями развития растений и т.д. Кроме того, использование ДЗЗ совместно с различной статистической и другими видами информации позволяет получить высококачественные данные о нынешнем состоянии посевов. Основными особенностями данных ДЗЗ являются:

- актуальность получаемой информации;
- высокая достоверность получаемой информации;
- высокая периодичность получения информации;
- широкий охват исследуемой территории;
- получение данных в едином стандартизованном виде;
- возможность накопления статистической информации и использования ее для прогнозов урожайности и оценок ущерба [3].

Для успешного применения при мониторинге сельского хозяйства системы дистанционного зондирования должны отвечать следующим условиям [4]:

1. Возможность осуществления сбора данных, их коррекции и первичной обработки в течение 24-48 часов;
2. Невысокая (доступная) стоимость данных;
3. Высокое пространственное разрешение (порядка 5 м для спектральной съемки);
4. Высокое спектральное разрешение (порядка 10-20 нм) для повышения точности определения биофизических параметров растительного покрова;
5. Высокое временное разрешение, обеспечивающее, по крайней мере, 5-6 сеансов получения информации в течение вегетационного периода;
6. Возможность предоставления результатов тематической интерпретации данных в доступных пользователю форматах.

Оценка влажности почвы с использованием данных ДЗЗ стала активной областью исследований, особенно в свете растущих потребностей в управлении природными ресурсами и устойчивом развитии сельского хозяйства.

Исследования [5, 6, 7] показывают, что комплексное использование гиперспектральных, оптических и радиолокационных данных могут быть использованы для точной оценки влажности почвы через анализ спектров отражения, а также благодаря их чувствительности к изменениям в текстуре и структуре почвы.

Многие исследования [8] подчеркивают важность калибровки и валидации результатов с использованием наземных измерений, что критично для повышения достоверности получаемых данных.

Основное внимание в исследованиях дистанционного зондирования в области гидрологии было уделено разработке подходов для оценки гидрометеорологических состояний и потоков распределенным образом. Основной набор переменных состояний включает температуру поверхности земли, влажность поверхностного слоя почвы, снежный покров/водный эквивалент, качество воды, шероховатость ландшафта, землепользование, растительный покров и температуру голой почвы, альбедо поверхности и растительный покров. Гидрометеорологические потоки в первую очередь включают испарение почвы, скорость осадков, скорость пополнения, подповерхностный сток и транспирацию растений или эвапотранспирацию, а также сток таяния снега [9].

Современные технологии дистанционного зондирования, такие как спутниковые миссии GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) и SMAP (Soil Moisture Active Passive) играют критическую роль в мониторинге глобальных изменений запасов воды и влажности почвы [10, 11, 12]. GRACE предоставляет данные о динамике подземных вод и водного эквивалента снега, позволяя оценивать долгосрочные тренды водного баланса в регионах с ограниченными наземными наблюдениями. SMAP, в свою очередь, обеспечивает высокоточные данные о влажности почвы на глобальном уровне, что помогает моделировать процессы, связанные с водным циклом, сельскохозяйственной засухой и климатическими изменениями.

Кроме того, для интерпретации данных дистанционного зондирования используются модели, которые могут интегрировать как спутниковые, так и наземные наблюдения, что позволяет более точно оценивать состояние водных ресурсов и прогнозировать их изменения в условиях изменения климата. Например, показатели влажности почвы и снежного покрова могут быть использованы для оценки риска засухи или наводнений, что важно для управления водными ресурсами и сельскохозяйственным планированием.

Также растет интерес к использованию машинного обучения для анализа больших данных, получаемых со спутников. Такой подход улучшает качество прогнозов, а также автоматизирует процессы обработки данных в режиме реального времени, с использованием больших объемов данных за несколько лет [13].

О важности и актуальности мониторинга экологического состояния агроценозов говорит следующий факт. В Республике Казахстан по данным более 100-летних наблюдений, увеличение температуры уже составило около 2 °С. При этом в последние четыре десятилетия температура повышается более быстрыми темпами в среднем на 0,4 °С каждые 10 лет. Согласно разработанным учеными сценариям изменения климата в Казахстане, в течение 21 века ожидается дальнейшее увеличение среднегодовой температуры в среднем на 1-4 °С. При этом по данным моделирования всех рассматриваемых сценариев с изменением климата ожидается уменьшение количества осадков с мая по сентябрь [14].

Космический мониторинг за влажностью почв охватывает большие территории, является достоверным и обладает некоторой степенью оперативности.

Для Республики Казахстан при поступательном развитии собственных космических технологий, развитии деятельности космической системы ДЗЗ, космический мониторинг сельскохозяйственного производства для агропромышленного комплекса имеет высокий практический интерес и глубоко актуален на сегодняшний день.

Обзор литературы показывает, что ДЗЗ является мощным инструментом для оценки влажности почвы. Комбинирование различных методов и алгоритмов, а также интеграция данных с наземными измерениями значительно повышают точность и надежность получаемых результатов. Эти технологии продолжают развиваться, что открывает новые возможности для эффективного управления ресурсами и устойчивого развития сельского хозяйства.

Материалы и методы

Для разработки стратегии управления почвенной влагой, особенно в условиях изменения климата и интенсификации сельскохозяйственного производства, необходима комплексная оценка экологических факторов, влияющих на ее содержание.

Во-первых, изучение погодно-климатических условий зоны интереса, что включает анализ количества осадков за осенне-зимний период, анализ запасов воды в снеге, глубину промерзания почв и др.

Во-вторых, анализ гидроморфизма почв. Уровень грунтовых вод зоны интереса в предпосевной период отслеживался через глобальный ресурс Grace Follow-On.

Следующий этап – проведение полевых исследований по оценке влажности почв по тестовым полигонам территории Северного Казахстана.

Влажность определялась полевым емкостным влагомером (измеряет влажность на основе изменения электрической проводимости) на глубину посевного слоя, с пересчетом % влажности в запасы продуктивной влаги в почве по следующей формуле:

$$W=(V\times P)/100,$$

где:

W – запас продуктивной влаги в посевном слое почв, мм;

V – объем почвы, м³;

P – процент влажности, %.

После получения данных была проведена калибровка данных и построение картограммы влажности по контрольным участкам.

Индексы дистанционного зондирования, такие как нормализованный разностный растительный индекс (NDVI), нормализованный разностный водный индекс (NDWI) и

нормализованный разностный индекс влажности (NDMI или soil moisture) дают важную информацию о состоянии растительности, идентификации водных объектов и содержании влаги в почве [15]. Это исследование сосредоточено на анализе значений, полученных на основе этих индексов, в частности, о состоянии растительности, наличии воды и влажности почвы.

Далее проводили тематический анализ данных ДЗЗ с применением индексов: NDVI, NDWI, NDMI, mCDI.

Snow Water Equivalent (SWE) – это важный показатель, который используется для оценки количества воды, содержащейся в снежном покрове. Он рассчитывается на основе ДЗЗ и других методов. SWE представляет собой количество воды, которое получится при таянии снежного покрова. Для расчета SWE с использованием данных ДЗЗ применяют спутниковые измерения и модели, которые включают в себя данные о толщине снежного покрова (snow depth), плотности снега (snow density) и другие характеристики. Для измерения толщины снежного покрова часто используют радиолокационные альтиметры или микроволновое излучение, что позволяет пробивать толщу снега и дать оценку глубины и плотности снега. Исходный спектральный индекс SWE загружен из сайта Copernicus.

$SWE = \text{Толщина снега (snow depth)} \times \text{Плотность снега (snow density)} / \text{Плотность воды}$.

Для расчета индекса SWE источниками данных являются спутники:

1. NASA GRACE/GRACE – FO, которые оценивают изменения в массе воды, включая снег, включают измерения гравитации на поверхности Земли;
2. Sentinel – 1, Sentinel – 3, предоставляют данные активного радиолокационного зондирования для оценки снежных запасов;
3. AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer);
4. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer);
5. ERA5, модель повторного анализа, где объединены данные наблюдений с глобальными моделями атмосферных процессов для вычисления параметров снега и покрова SWE;
6. NOAA/NASA Snow Data Assimilation System (SNODAS), данная модель объединяет наземные измерения и данные спутников для оценки снежного покрова и SWE.

Характеристика индекса SWE для территории Республики Казахстан – это важный процесс для понимания водных ресурсов, климатических условий и потенциала снежного покрова в регионе. Индекс важен для управления водными ресурсами, прогнозирования стока воды, оценки риска наводнений и засух. Значение, полученное в период с декабря 2023 года по март 2024 год, для Северо-Казахстанской и Акмолинской областей можно считать ниже среднего для зимнего сезона. В северных регионах Казахстана снежный покров зимой может достигать нескольких десятков сантиметров, а значение SWE часто превышает 10-20 см, что эквивалентно более высокой водной массе при таянии снега.

Интерпретация данных на территорию двух областей Республики Казахстан, с показателем $SWE = 0.04566865610573633$ (рисунок 1):

- Северо-Казахстанская область находится в зоне с умеренным континентальным климатом с холодными зимами и обильными снегопадами. Для этого региона SWE в 4,57 см в зимний период можно считать достаточно низким показателем.
- Акмолинская область также расположена в климатической зоне с холодными и снежными зимами. Снежный покров обычно бывает обильнее. Поэтому такое значение тоже можно интерпретировать как ниже среднего.

Результаты и обсуждение

Результаты показывают, что уменьшение количества снега и более низкое значение SWE могут указывать на потепление климата, незначительные осадки зимой, и как следствие более низкий объем талой воды весной. В результате, весенне-летний период негативно сказывается на водоснабжении.

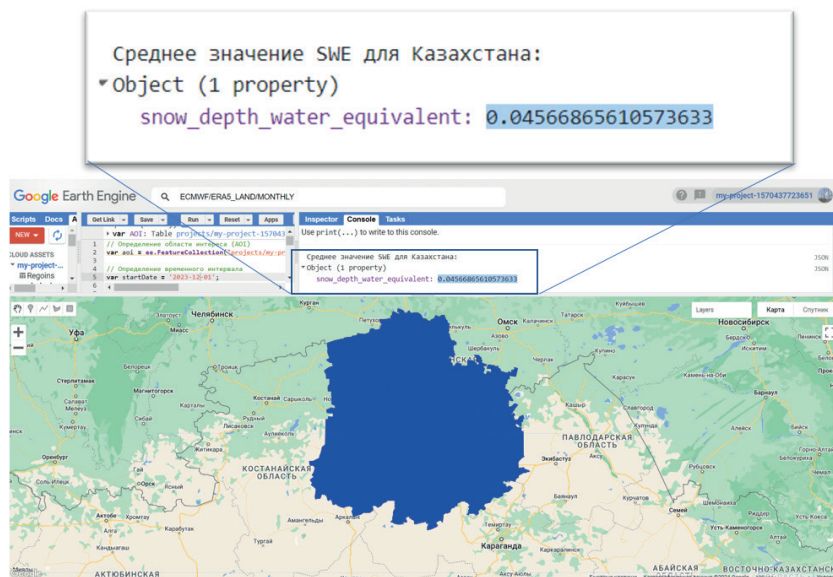


Рисунок 1 – Расчет индекса SWE на территории Северного Казахстана

Уровень грунтовых вод зоны интереса в предпосевной период отслеживался через глобальный ресурс Grace Follow-On, спутниковую миссию, разработанную для мониторинга подземных вод и других аспектов земной гидрологии. Она является продолжением миссии GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), которая использовала спутники для измерения изменений в гравитационном поле Земли, что позволяет определять уровни подземных вод и их изменения во времени.

При проведении полевых исследований по тестовым полигонам за единицу отбора почвенного образца был принят элементарный участок, который максимально консолидирует и усредняет параметры рельефа, растительности, почвы, гранулометрического состава, антропогенной нагрузки и т.д. (рисунок 2).



Рисунок 2 – Схема элементарных участков для отбора почвенных проб

Ученые Центра космических полетов имени Годдарда НАСА каждую неделю публикуют показатели влажности грунтовых вод и уровня засухи (рисунок 3). Эти данные основаны на измерениях запасов воды на суше, полученных с помощью спутниковых данных GRACE-Follow On (GRACE-FO), и объединены с другими наблюдениями с использованием сложной численной модели поверхностных водных и энергетических процессов.

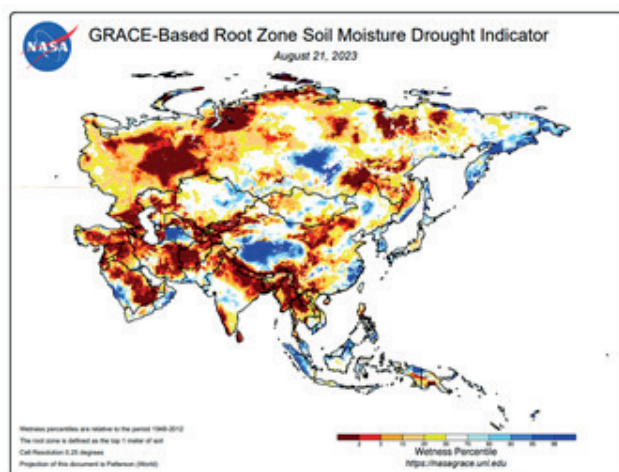


Рисунок 3 – Данные по влажности почвы с сайта NASA

Индикаторы засухи описывают текущие условия, выраженные в виде процентиля (статистический показатель), показывающего вероятность наступления засухи в данном конкретном месте в это время года, при этом более низкие значения (теплые цвета) означают более сухую погоду, чем обычно, а более высокие значения (синие) означают более влажную погоду, чем обычно. Они предоставляются как в виде изображений, так и в виде двоичных файлов данных. Смежные индикаторы США (CONUS) отображаются с разрешением 0,125 градуса, в то время как глобальные наземные индикаторы отображаются с разрешением 0,25 градуса (глобальные/Африка/Азия/Австралия/Европа/Северная Америка/Южная Америка). Зона интереса по территории Республики Казахстан за 2023 год расположена в диапазоне от 30-70 процентиля.

В зоне интереса на территории Северо-Казахстанской и Акмолинской областей запасы воды в грунте увеличились за 2023-2024 годы, что связано с повышением осадков, возможным изменением климата и колебаниями в атмосферной циркуляции (рисунок 4).

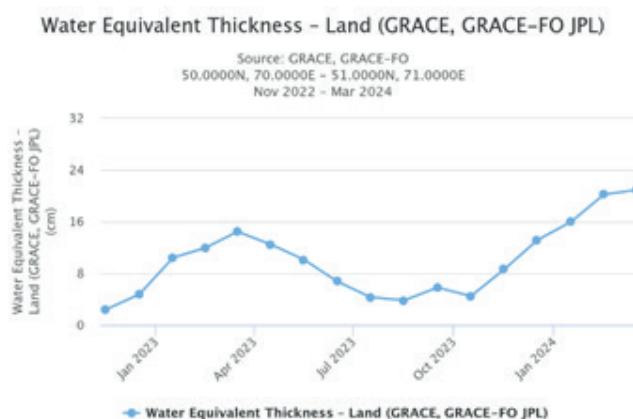


Рисунок 4 – Толщина эквивалента воды в грунте за 2023- 2024 годы на территории зоны интереса

Однако, стоит отметить, что интерпретировать данный тренд за один год неприемлемо. Долгосрочные наблюдения показывают значительные последствия, приводимые для управления водными ресурсами и адаптации к изменению климатических условий в данном регионе (рисунок 5).

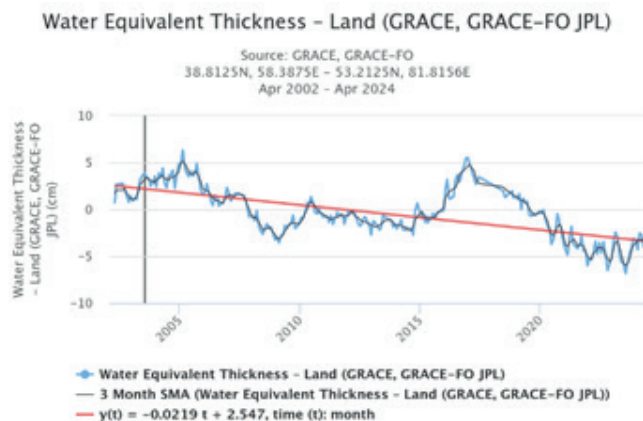


Рисунок 5 – Тенденция уровня грунтовых вод за период с 2002 по 2024 годы на территории зоны интереса

В целом, ниспадающий тренд может указывать на уменьшение запасов воды в грунте и подземных водах.

Индексы дистанционного зондирования, такие как нормализованный разностный растительный индекс (NDVI), нормализованный разностный водный индекс (NDWI) и нормализованный разностный индекс влажности (NDMI или soil moisture) дают важную информацию о состоянии растительности, идентификации водных объектов и содержании влаги в почве [15]. Это исследование сосредоточено на анализе значений, полученных на основе этих индексов, в частности, о состоянии растительности, наличии воды и влажности почвы.

Средние значения NDVI, рассчитанные для исследуемого района, показали устойчивую закономерность, с умеренно положительными значениями в диапазоне от 0,2 до 0,4, что указывает на наличие лугопастбищных угодий (рисунок 6). При этом, несмотря на наличие растительности, она не является густой, и территория может состоять в основном из полузасушливых экосистем.

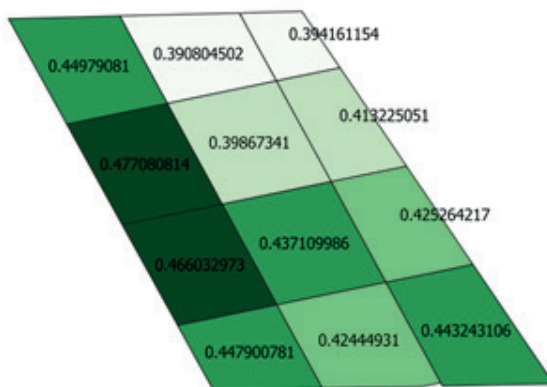


Рисунок 6 – Индекс NDVI элементарных участков

Полученные данные свидетельствуют о том, что растительный покров в регионе умеренный, без значительных площадей густых лесов или районов с высокой растительностью, могут существовать сезонные или экологические факторы, ограничивающие рост густой растительности.

Данные NDWI показали, что средние значения близки к 0,4, что немного ниже порогового значения, обычно ассоциируемого с водоемами (>0,5) (рисунок 7).

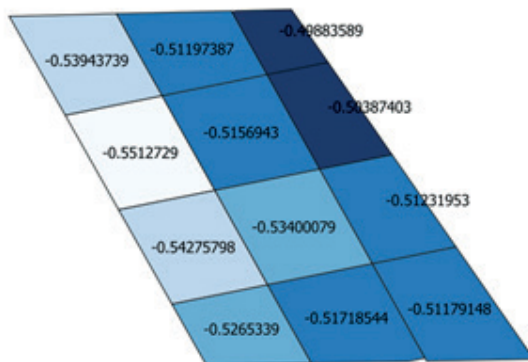


Рисунок 7 – Индекс NDWI элементарных участков

Это говорит о том, что оцениваемые районы, вероятно, содержат некоторое количество влаги или влажный рельеф. Хотя значения NDWI не превышают 0,5, незначительно положительные значения указывают на наличие лиманов или временно насыщенных почв. Это свидетельствует о наличии влаги, но не в виде крупных или устойчивых водоемов.

Средние значения *NDMI* колебались между 0,2 и 0,4, что отражает умеренный уровень влажности растительности, хотя и не указывает на сильную засуху или экстремальный дефицит воды (рисунок 8). Эти значения *NDMI* свидетельствуют о том, что, хотя растительность в этом районе не испытывает сильного водного дефицита, она также не процветает при высоком содержании влаги. Это может свидетельствовать об относительно сбалансированной, но несколько засушливой экосистеме, что согласуется с выводами *NDVI* и *NDWI* о наличии лугопастбищных угодий.

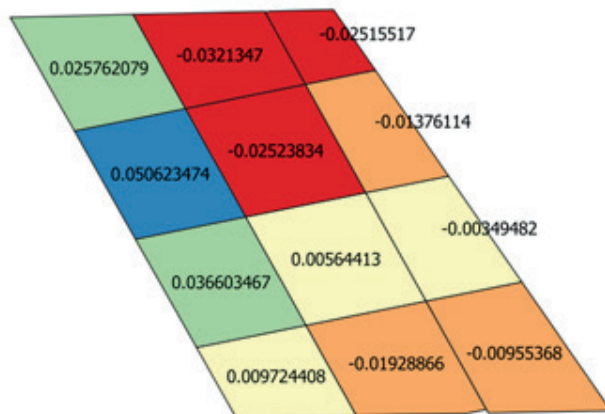


Рисунок 8 – Soil moisture элементарных участков

Модифицированный Комбинированный Индекс Дефицита (*mCDI*) – это индикатор, разработанный для оценки состояния засухи, особенно сельскохозяйственной, на определённой территории. Он основывается на комбинировании нескольких показателей, таких как:

- Дефицит осадков;
- Дефицит растительности (*NDVI*);
- Влажность почвы.

mCDI выражает насколько текущие климатические условия (недостаток осадков, засуха в почве) отличаются от нормальных для данного периода и места. Индекс помогает оценить испытывает ли регион нехватку воды и как это может повлиять на сельскохозяйственные культуры и экосистемы.

Обычно индекс *mCDI* рассчитывается как линейная комбинация нескольких показателей с разными весовыми коэффициентами:

$$mCDI = (\text{Standartized Precipitation Index} + \text{Soil Moisture} + \text{Water Index})/3,$$

Где: SPI (Standardized Precipitation Index) рассчитывается для разных временных интервалов - 1, 3, 6, 12 месяцев или более. Для краткосрочного анализа засухи можно использовать данные за 3-6 месяцев, а для анализа долгосрочных тенденций засухи лучше брать данные за 12 месяцев или более.

SMI (Soil Moisture Index) - обычно данных за последние 5-10 лет достаточно для оценки краткосрочных изменений влажности почвы. Однако, если доступны более долгосрочные данные, это улучшит точность.

Гидрологические индексы - анализ запасов подземных вод и речного стока, требует, как минимум данных за 10 лет, чтобы учитывать сезонные и долгосрочные колебания.

Оптимальный временной период для расчета mCDI:

Краткосрочный анализ (1-3 года) для оперативного мониторинга и оценки текущей засухи или водного дефицита.

Среднесрочный анализ (5-10 лет) помогает выявить изменения в условиях засухи и дефицита воды в зависимости от климатических циклов и позволяет лучше понять региональные тенденции.

Долгосрочный анализ (20-30 лет) наиболее предпочтительный период для полной оценки климатических изменений и долгосрочной динамики засухи. Особенно важен для регионов с переменчивым климатом, таких как Северный Казахстан.

В нашем случае:

$$mCDI = \frac{(-0.5)+0.0508+0.2166+(-0.3)}{4} = \frac{-0.126}{4} = -0.03$$

Значение указывает на умеренный дефицит водных ресурсов.

Индекс почвенной воды количественно определяет состояние влажности на различной глубине в почве. Это в основном обусловлено осадждением в процессе инфильтрации. Влажность почвы является очень неоднородной переменной и изменяется в небольших масштабах в зависимости от свойств почвы и характера дренажа. Спутниковые измерения интегрируются по относительно крупномасштабным площадям, а наличие растительности усложняет интерпретацию.

Влажность почвы на глубине до 5 см признана важнейшей климатической переменной (ECV) Глобальной системой наблюдения за климатом (ГСНК).

Индекс почвенной воды предоставляется над Европой, с разрешением 1 км, на основе поверхностной влажности почвы Sentinel-1 C-диапазона SAR (продукт SSM) и EUMETSAT и SAF Metop ASCAT поверхностной влажности почвы, в глобальном масштабе с разрешением 0,1 градуса или 12,5 км на основе тех же наблюдений за влажностью почвы Metop ASCAT (рисунок 9).

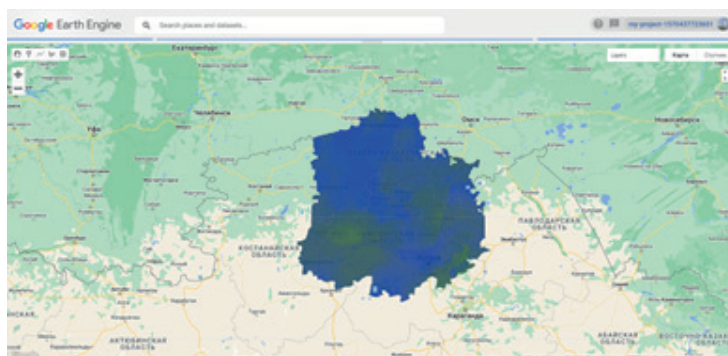


Рисунок 9 – Влажность почвы в пределах Северо-Казахстанской и Акмолинской областей

Значения по влажности почвы взяты со спутников SMAP (Soil Moisture Active Passive), который измеряет ее на верхних слоях поверхности (5 см). Расширенный набор данных SMAP НАСА и Министерства сельского хозяйства США объединяет данные наблюдений за влажностью почвы уровня SMAP 2 в модифицированную модель Палмера с использованием 1-мерного фильтра Калмана, улучшая оценку влажности почвы на основе модели, особенно в районах с нехваткой качественных приборов для измерения осадков (рисунок 10).

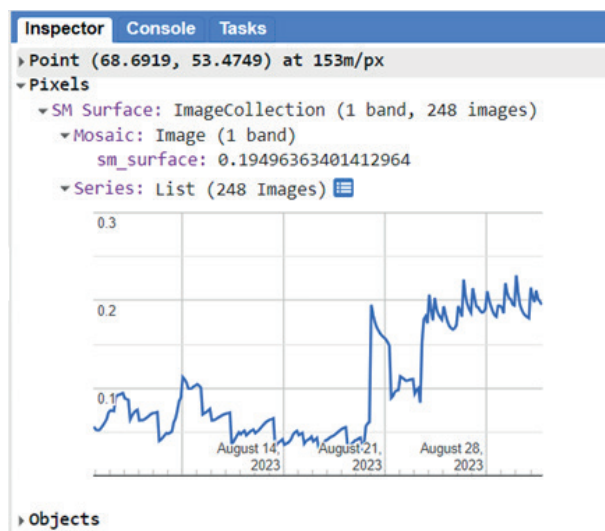


Рисунок 10 – Soil moisture на примере одного градиента пиксела

Заключение

Комплексный анализ содержания почвенной влаги в поверхностном слое почвы в предпосевной период 2024 года показал, что существует умеренный дефицит водных ресурсов. Значение SWE 0.04566865610573633 в Северо-Казахстанской области в зимний период определяется как достаточно низким показателем, в Акмолинской области снежный покров обычно бывает обильнее и поэтому данное значение тоже можно интерпретировать как ниже среднего. Индекс mCDI подтверждает наличие умеренного дефицита водных ресурсов, что требует внимания для адаптации аграрных практик к текущим условиям. Значения индексов NDVI, NDWI и NDMI также свидетельствуют о наличии влаги, но ее недостаточно для поддержания высокопродуктивных экосистем. По результатам исследования отмечаем умеренную положительную связь между данными ДЗЗ и наземными измерениями влажности поверхностного слоя почвы, коэффициент корреляции составил в среднем 0,45. Оценка предпосевного содержания влаги в посевном слое почвы на территории Северо-Казахстанской и Акмолинской областей указывают на неблагоприятные условия для весенних посевов: недостаточная влажность в посевном слое почвы может затруднить рост сельскохозяйственных культур, особенно в условиях продолжающегося изменения климата и увеличения риска засух. Дистанционные методы оценки после определенной калибровки и адаптации могут достаточно точно оценить запасы влаги в поверхностном слое почвы для равнинных территорий.

Вклад авторов

ГК: Инициировал и разработал концепцию исследования, участвовал в интерпретации результатов дистанционного зондирования Земли, осуществлял общий надзор за исследованием, провел сбор и обработку литературных данных, участвовал в написании рукописи для публикации и ее оформлении. БР: Инициировал и разработал концепцию исследования, проводил полевые работы, включая отбор почвенных образцов, участвовал в калибровке данных ДЗЗ, выполнил анализ статистических данных, осуществил общий надзор за исследованием, внес корректировки в методологическую часть статьи, а также участвовал в редактировании и подготовке рукописи. ДТ: Участвовал в обработке и получении результатов данных дистанционного зондирования Земли (растровых и векторных баз данных), с использованием ГИС, и облачных решений, провел анализ и подсчет полученных данных, участвовал в написании и редактировании рукописи к публикации.

Информация о финансировании

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23485181) на 2024-2026 гг.

Список литературы

- 1 *Рекомендации по весенне-полевым работам в Акмолинской области в 2020 году.* https://baraev.kz/recomendaciya/recomendaiya_proizvodstva/1339-rekomendacii-po-vpr-npczh-2020.html.
- 2 Боложи, А. (2014). Запасы влаги в почве перед посевом. <http://agroinfo.kz/zapasy-vlagi-v-pochve-pered-posevom/>
- 3 *Интерпретация комбинаций каналов данных Landsat TM ETM* [электронный ресурс]. <http://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html>
- 4 Barnes, EM, Moran, MS, Pinter, P., Clarke, T. (2015). Multispectral Remote Sensing and Site-Specific Agriculture: Examples of Current Technology and Future Possibilities. *Precision Agriculture*, 845-854.
- 5 Lee, S.-J, Choi, C., Kim, J., Choi, M., Cho, J., Lee, Y. (2023). Estimation of High-Resolution Soil Moisture in Canadian Croplands Using Deep Neural Network with Sentinel-1 and Sentinel-2 Images. *Remote Sens.*, 15, 4063. DOI: 10.3390/rs15164063.
- 6 Neelam, M., Mohanty, BP. (2015). Global sensitivity analysis of the radiative transfer model. *Water Resources Research*, 51, 2428-2443.
- 7 Das, K., Paul, PK, Dobesova, Z. (2015). Present status of soil moisture estimation by microwave remote sensing. *Cogent Geoscience*, 1(1). DOI: 10.1080/23312041.2015.1084669.
- 8 Wang, L., Qu, JJ. (2009). Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. *Front. Earth Sci.*, 3, 237-247. DOI: 10.1007/s11707-009-0023-7.
- 9 Schmugge, TJ, Kustas, WP, Ritchie, JC, Jackson, TJ, Rango, A. (2002). Remote sensing in hydrology. *Advances in Water Resources*, 25(8-12), 1367-1385.
- 10 Gruber, A., Scanlon, T., van der Schalie, R., Wagner, W., Dorigo, W. (2019). Evolution of the ESA CCI Soil Moisture climate data records and their underlying merging methodology, *Earth Syst. Sci.*, 11, 717-739, DOI: 10.5194/essd-11-717-2019.
- 11 Dorigo, WA, Wagner, W., Albergel, C., Albrecht, F., Balsamo, G., Brocca, L., Chung, D., Ertl, M., Forkel, M., Gruber, A., Haas, E., Hamer, DP, Hirschi, M., Ikonen, J., De Jeu, R. Kidd, R. Lahoz, W., Liu, YY, Miralles, D., Lecomte, P. (2017). ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: State-of-the art and future directions. *In Remote Sensing of Environment*, 203, 185-215. DOI: 10.1016/j.rse.2017.07.001.
- 12 Gruber, A., Dorigo, WA, Crow, W., Wagner, W. (2017). Triple Collocation-Based Merging of Satellite Soil Moisture Retrievals. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1-13. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2734070.
- 13 Sazib, N., Mladenova, I. Bolten, J. (2018). Leveraging the google earth engine for drought assessment using global soil moisture data. *Remote sensing*, 10(8), 1265. DOI:10.3390/rs10081265.
- 14 Восьмое Национальное Сообщение и Пятый Двухгодичный Доклад Республики Казахстан Рамочной Конвенции ООН об Изменении Климата. (2022).
- 15 Yingxin, Gu, Hunt, E., Wardlow, B., Basara, JB, Brown, JF. Verdin, JP. (2008). Evaluation of MODIS NDVI and NDWI for vegetation drought monitoring using Oklahoma Mesonet soil moisture data, *Hydrology and Land Surface Studies*, 35, 22. DOI:0.1029/2008GL035772.

References

- 1 *Rekomendacii po vesenne-polevym rabotam v Akmolinskoj oblasti v 2020 godu.* https://baraev.kz/recomendaciya/recomendaiya_proizvodstva/1339-rekomendacii-po-vpr-npczh-2020.html.
- 2 Bolozhi, A. (2014). Zapasy vlagi v pochve pered posevom. <http://agroinfo.kz/zapasy-vlagi-v-pochve-pered-posevom/>
- 3 *Interpretaciya kombinacij kanalov dannyh Landsat TM / ETM+* [elektronnyj resurs]: <http://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html>
- 4 Barnes, EM, Moran, MS, Pinter, P., Clarke, T. (1996). Multispectral Remote Sensing and Site-Specific Agriculture: Examples of Current Technology and Future Possibilities. *Precision Agriculture*, 845-854.

- 5 Lee, S-J, Choi, C., Kim, J., Choi, M., Cho, J., Lee, Y. (2023). Estimation of High-Resolution Soil Moisture in Canadian Croplands Using Deep Neural Network with Sentinel-1 and Sentinel-2 Images. *Remote Sens.*, 15, 4063. DOI:10.3390/rs15164063.
- 6 Neelam, M., Mohanty, BP. (2015). Global sensitivity analysis of the radiative transfer model. *Water Resources Research*, 51, 2428-2443.
- 7 Das, K., Paul, PK, Dobesova, Z. (2015). Present status of soil moisture estimation by microwave remote sensing. *Cogent Geoscience*, 1(1). DOI:10.1080/23312041.2015.1084669.
- 8 Wang, L., Qu, JJ. (2009). Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. *Front. Earth Sci.*, 3, 237-247. DOI:10.1007/s11707-009-0023-7.
- 9 Schmugge, TJ, Kustas, WP, Ritchie, JC, Jackson, TJ, Rango, A. (2002). Remote sensing in hydrology. *Advances in Water Resources*, 25(8-12), 1367-1385.
- 10 Gruber, A., Scanlon, T., van der Schalie, R., Wagner, W., Dorigo, W. (2019). Evolution of the ESA CCI Soil Moisture climate data records and their underlying merging methodology, *Earth Syst. Sci.*, 11, 717-739, DOI:10.5194/essd-11-717-2019.
- 11 Dorigo, WA, Wagner, W., Albergel, C., Albrecht, F., Balsamo, G., Brocca, L., Chung, D., Ertl, M., Forkel, M., Gruber, A., Haas, E., Hamer, DP, Hirschi, M., Ikonen, J., De Jeu, R. Kidd, R. Lahoz, W., Liu, YY, Miralles, D., Lecomte, P. (2017). ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: State-of-the art and future directions. *In Remote Sensing of Environment*, 203, 185-215. DOI: 10.1016/j.rse.2017.07.001.
- 12 Gruber, A., Dorigo, WA, Crow, W., Wagner, W. (2017). Triple Collocation-Based Merging of Satellite Soil Moisture Retrievals. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1-13. DOI:10.1109/TGRS.2017.2734070.
- 13 Sazib, N., Mladenova, I., Bolten, J. (2018). Leveraging the google earth engine for drought assessment using global soil moisture data. *Remote sensing*, 10(8), 1265. DOI:10.3390/rs10081265.
- 14 Vosmoe Nacional'noe Soobshchenie i Pyatyi Dvuhgodichnyj Doklad Respubliki Kazahstan Ramochnoj Konvencii OON ob Izmenenii Klimata. (2022).
- 15 Gu Y., Hunt, E., Wardlow, B., Basara, JB, Brown, JF, Verdin, JP. (2008). Evaluation of MODIS NDVI and NDWI for vegetation drought monitoring using Oklahoma Mesonet soil moisture data. *Hydrology and Land Surface Studies*, 35, 22. DOI:10.1029/2008GL035772.

Солтүстік Қазақстан аумағының топырақ ылғалдылығын қашықтықтан мониторингтеу мүмкіндіктерін бағалау

Кабжанова Г.Р., Рахимжанов Б.К., Тулеукулова Д.Т.

Түйін

Алғышарттар мен мақсат. Топырақ қабатындағы егіс алдындағы ылғалдылықты бағалау ауылшаруашылық өндірісін тиімді басқару үшін қажет, әсіресе қауіпті егіншілік аймағында. Солтүстік Қазақстан елдегі ауыл шаруашылығы өндірісі үшін негізгі өңір болып табылады және климаттың жаһандық өзгерістерін, өңірдің агроөнеркәсіп өндірісіндегі (кұрғақшылық, эрозия және т.б.) тәуекелдерге ұшырауын ескере отырып, ауыл шаруашылығы өндірісінің жағдайларын жедел бағалау және қашықтықтан мониторинг жүргізу әдістерін енгізу қажет.

Материалдар мен әдістер. Спутниктік деректер топырақтың ылғалдылығы мен өсімдік жағдайын бағалау үшін қолданылады. Жер үсті деректерін калибрлеу спутниктік деректердің дәлдігін жақсарту үшін топырақ үлгілерін таңдау арқылы жүргізілді. Топырақтың ылғалдылығы электр өткізгіштігін өлшеуге негізделген капацитивті ылғал өлшегіштің көмегімен өлшенді және сынамалар егіс алдындағы кезеңде Солтүстік Қазақстанның бүкіл аумағында, егіс қабатының тереңдігінде алынды. Ылғалдылықтың көлемі мен пайызын ескере отырып, топырақтағы өнімді ылғалдылық қорларын есептеу жүргізілді. Бұл жердегі өлшеулер спутниктік индикаторларды калибрлеу үшін бақылау деректері ретінде қызмет етті. Калибрленген деректер аймақ бойынша ылғалдылықтың кеңістіктік өзгергіштігін көрсете отырып, топырақ ылғалдылығының таралуын картаға түсіруге мүмкіндік берді.

Нәтижелер. Қашықтықтан зондтау деректері мен жердегі деректерді пайдалана отырып, спутниктік талдау аймақтағы топырақ ылғалдылығының кеңістіктік таралу ерекшеліктерін анықтады. Қар жамылғысының маусымдық ауытқуы бойынша есептеулер алынды және оның төмен тығыздығы қысқы кезеңде су ресурстарының жеткіліксіз жинақталуын болжайды, бұл Солтүстік Қазақстан аумағында көктемгі кезеңде топырақтың өнімді ылғалдылық деңгейіне әсер етеді.

Қорытынды. Жүргізілген зерттеу ЖҚЗ деректерін және жерүсті өлшемдерін пайдалана отырып, топырақ ылғалдылығын бағалау әдістері Солтүстік Қазақстандағы топырақтың жай-күйін жедел мониторингтеудің тиімді құралы болып табылатынын көрсетеді. Спектрлік индекстерді (NDVI, NDWI, ndmi) және су тапшылығы индекстерін (mCDI және SWE) кешенді талдау су ресурстарының орташа тапшылығын анықтады. Бұл тапшылық қол жетімді ылғалды оңтайлы пайдалану үшін аграрлық тәжірибелерді бейімдеуді талап етеді. Алынған мәліметтер негізінде ылғал үнемдейтін технологияларды енгізу, егіс циклдерін дәлірек жоспарлау және агротехнологияларды ағымдағы гидрометеорологиялық жағдайларға бейімдеу ұсынылады, бұл су тапшылығының әсерін жұмсартуға және қауіпті егіншілік аймағында ауыл шаруашылығы өндірісінің тұрақтылығын жақсартуға мүмкіндік береді.

Кілт сөздер: топырақтың ылғалдылығы; агроөндіріс; қашықтықтан зондтау; геоақпараттық жүйелер.

Assessment of the possibilities of remote monitoring of soil moisture in the territory of northern Kazakhstan

Gulnara R. Kabzhanova, Berik K. Rakhimzhanov, Dana T. Tuleukulova

Abstract

Background and Aim. Assessment of the pre-sowing moisture content in the sown soil layer is necessary for effective management of agricultural production, especially in the zone of risky farming. Northern Kazakhstan is a key region for agricultural production in the country, and given global climate change, the region's exposure to risks in agricultural production (drought, erosion, etc.), it is necessary to introduce methods for operational assessment of conditions and remote monitoring of agricultural production.

Materials and Methods. Satellite data were used to assess the moisture content in the soil and the state of vegetation. Calibration of ground data was carried out by sampling soil samples to improve the accuracy of satellite data. Soil moisture was measured using a capacitive moisture meter based on the measurement of electrical conductivity, and samples were taken in the pre-sowing period throughout the territory of Northern Kazakhstan, at the depth of the sowing layer. Calculations of reserves of productive moisture in the soil have been made, taking into account the volume and percentage of moisture content. These ground-based measurements served as reference data for the calibration of satellite indicators. The calibrated data made it possible to map the distribution of soil moisture, highlighting the spatial variability of humidity in the region.

Results. Satellite analysis using remote sensing and ground-based data revealed the features of the spatial distribution of soil moisture in the region. Calculations on seasonal fluctuations of snow cover and its low density suggest insufficient accumulation of water resources in winter, which affects the level of productive soil moisture in spring in the territory of Northern Kazakhstan.

Conclusion. The conducted research demonstrates that methods for assessing soil moisture using remote sensing data and ground measurements are an effective tool for operational monitoring of soil conditions in Northern Kazakhstan. A comprehensive analysis of spectral indices (NDVI, NDWI, NDMI) and water scarcity indices (mCDI and SWE) revealed moderate water scarcity. This deficiency requires the adaptation of agricultural practices for optimal use of available moisture. Based on the data obtained, it is recommended to introduce moisture-saving technologies, more accurate planning of sowing cycles and adaptation of agricultural technologies to current hydrometeorological conditions, which will mitigate the impact of water scarcity and improve the stability of agricultural production in the zone of risky farming.

Keywords: soil moisture; agricultural production; remote sensing; geoinformational system.