

УДК 631.434:631.459(476)

Поступила в редакцию 27.11.2025
Received 27.11.2025

ОЦЕНКА ПРОЯВЛЕНИЯ ЗАСУХ НА ПОЧВАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ БЕЛОРУССКОГО ПООЗЕРЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫХ И ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

С. А. Лысенко, И. В. Буяков, В. И. Мельник

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье исследуются возможности определения влажности почвы на территории Белорусского Поозерья на основе микроволнового и мультиспектрального оптического зондирования Земли. Предлагается способ определения влажности почвы, основанный на дополнении результатов микроволнового зондирования Земли оценками суточных вариаций температуры подстилающей поверхности, измеряемой спутниковыми радиометрами в окне прозрачности атмосферы 10–12 мкм, и получении калибровочного уравнения на основе реанализа ERA5-Land. Предложенный способ реализован для Белорусского Поозерья на базе платформы облачных вычислений Google Earth Engine. Показано, что сопоставление текущих оценок влажности почвы, вегетационного индекса и температуры подстилающей поверхности с их минимальными и максимальными значениями для заданного времени года позволяет оценивать интенсивность засухи, ее пространственное распределение и влияние на состояние посевов. Проанализированы многолетние изменения индекса здоровья растений (VHI), рассчитываемого по нормированным значениям вегетационного индекса NDVI и температуры подстилающей поверхности, для различных месяцев вегетационного периода. Показано, что более раннее наступление вегетационного периода улучшает состояние сельскохозяйственных растений в мае, однако в последующие месяцы условия вегетации ухудшаются. В июне на всей территории Витебской области, а в июле и августе в восточной части области возрастают риски температурного и водного стресса у растений, связанные с более частым образованием мощных блокирующих антициклонов. Выявленные в работе геопространственные особенности влияния изменений климата на состояние сельскохозяйственных растений необходимо учитывать для более эффективного использования нового агроклиматического потенциала Белорусского Поозерья.

Ключевые слова: изменение климата; засухи; влажность почвы; дистанционное зондирование; индекс здоровья растений.

Для цитирования. Лысенко С. А., Буяков И. В., Мельник В. И. Оценка проявления засух на почвах сельскохозяйственных земель Белорусского Поозерья с использованием температурно-влажностных и вегетационных индексов по данным дистанционного зондирования Земли // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 19–35.

ASSESSMENT OF DROUGHT MANIFESTATION ON SOILS OF AGRICULTURAL LANDS OF THE BELARUSIAN LAKELAND USING TEMPERATURE-MOISTURE AND VEGETATION INDICES BASED ON REMOTE SENSING DATA

S. A. Lysenko, I. V. Buyakov, V. I. Melnik

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The article studies the possibilities of determining soil moisture in the territory of the Belarusian Lakeland on the basis of microwave and multispectral optical Earth sensing. The method of soil moisture determination is proposed, based on supplementing the results of microwave Earth sensing with estimates of daily variations of the land surface temperature measured by satellite radiometers in the atmospheric transparency window of 10–12 μm , and obtaining the calibration equation based on the ERA5-Land reanalysis. The proposed method has been implemented for the Belarusian Lakeland on the basis of the Google Earth Engine cloud computing platform. It is shown that comparison of current estimates of soil moisture, vegetation index and land surface temperature with their minimum and maximum values for a given time of the year allows

estimating the intensity of drought, its spatial distribution and impact on the state of crops. Multiyear changes in the vegetation health index (VHI), calculated from normalised values of vegetation index NDVI and land surface temperature, were analysed for different months of the growing season. It is shown that earlier onset of the growing season improves the condition of agricultural plants in May, but in the following months the vegetation conditions deteriorate. In June in the whole territory of Vitebsk region, and in July and August in the western part of the region, the risks of temperature and water stress in plants increase due to more frequent formation of powerful blocking anticyclones. The geospatial peculiarities of climate change impact on agricultural plants revealed in this paper should be taken into account for more effective use of the new agroclimatic potential of the Belarusian Lakeland.

Keywords: climate change; droughts; soil moisture; remote sensing; vegetation health index.

For citation. Lysenko S. A., Buyakov I. V., Melnik V. I. Assessment of drought manifestation on soils of agricultural lands of the Belarusian Lakeland using temperature-moisture and vegetation indices based on remote sensing data // *Nature Management*, 2025, no. 2, pp. 19–35.

Введение. Наблюдаемые в последние десятилетия быстрые изменения агроклиматических условий в Беларуси существенным образом сказываются на продуктивности местных растительных сообществ и урожайности сельскохозяйственных культур. С одной стороны, увеличение продолжительности вегетационного периода и суммы активных температур открывает для сельского хозяйства Беларуси новые перспективы (в частности, становится возможным выращивание более теплолюбивых и доходных культур, которые раньше не вызревали в белорусском климате). С другой стороны, возрастает риск атмосферных засух и периодов экстремально высоких температур. Кроме того, более теплый и длинный вегетационный период может способствовать распространению новых видов вредителей и болезней.

В последние годы в научной литературе большое внимание уделялось изучению влияния изменений климата на продуктивность экосистем Белорусского Полесья, где формируется зона рискованного земледелия с устойчивым дефицитом водных ресурсов [1–4]. Однако при нынешних темпах потепления те агроклиматические условия, которые в современный период характеризуют юг Беларуси, уже через 30 лет будут относиться к северу страны [5]. Согласно расчетам климатических моделей CMIP6, тенденции изменения климата как на севере, так и на юге страны примерно одинаковы: рост среднегодовой температуры к 2050 г. на 2,8–3,8 °C относительно базового периода 1961–1990 гг. при практически неизменной годовой сумме атмосферных осадков [6]. Уже сейчас на севере страны (в Витебской области) суммарное испарение в теплый период года (май – сентябрь) превышает осадки на 10–30 мм, и в дальнейшем дефицит влаги будет только нарастать [3, 6]. В этой связи, чтобы максимально реализовать новый потенциал, сельскому хозяйству Беларуси потребуются адаптация к изменяющимся климатическим условиям с целью оптимизации водного режима и сохранения влаги в почве. Важным элементом будущей интегрированной системы адаптации к изменению климата станет система мониторинга и раннего предупреждения различных стадий засухи на основе комбинированной спутниковой и наземной информации.

Данные дистанционного зондирования Земли широко применяются для оценок влияния засух на растительные сообщества, поскольку предоставляют подробную картографическую информацию о состоянии посевных площадей и биопродуктивности в масштабах всей страны за длительный период. В качестве количественной меры состояния растительного покрова используются различные индексы, характеризующие поглощение растительностью фотосинтетически активной радиации, содержание хлорофилла и воды в почвенно-растительном покрове, тепловой стресс растений и т. п. [7]. Наиболее известными являются индексы, рассчитываемые по спектрам отражения земной поверхности в видимом и ближнем ИК-диапазонах – вегетационные индексы NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и EVI (Enhanced Vegetation Index), характеризующие общее состояние зеленой растительности; влажностный индекс NDWI (Normalized Difference Water Index), характеризующий содержание воды в растениях. Помимо этого, для оценки температурного и водного стресса у растений часто используются значения температуры подстилающей поверхности LST (Land Surface Temperature), измеряемой в тепловом ИК-диапазоне [8, 9]. Совместное использование вегетационных индексов и LST позволяет более достоверно оценивать различные аспекты засухи. Примером тому являются индексы сухости растительности TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index) и здоровья растений VHI (Vegetation Health Index), определяемые в пространстве индексов NDVI-LST [8, 10–15].

Стоит отметить, что методы оптического дистанционного зондирования (в видимом и инфракрасном диапазонах) позволяют лишь косвенно оценить влажность почвы. Прямое измерение влажности почвы из космоса возможно только методами микроволнового (радиолокационного) зондирования. Существующие спутниковые приборы, основанные на этом принципе, в зависимости от используемого в них источника

излучения разделяются на *активные радиолокаторы* (например, SAR – Synthetic Aperture Radar), посылающие радиоимпульс и принимающие отраженный от поверхности сигнал, и *пассивные радиометры* (например, SMAP – Soil Moisture Active Passive и SMOS – Soil Moisture and Ocean Salinity), измеряющие собственное микроволновое излучение Земли. Главной проблемой на пути использования этих данных в мониторинге почвенных засух является подверженность результатов измерений множеству помех, включая влияние растительности и шероховатости поверхности, типа почвы, ее засоленности и температуры, что требует использования сложных моделей для точной калибровки [12, 13].

В последние годы активно развиваются методы, основанные на слиянии данных оптического и микроволнового зондирования в алгоритмах машинного обучения. Использование многоспектральных оптических снимков в сочетании с радиолокационными данными позволяет повысить пространственное разрешение карт влажности и более эффективно компенсировать помехи от растительности [14–17].

Цель работы – проанализировать возможности использования данных спутникового микроволнового радиометра SMAP (NASA) и мультиспектральных оптических сенсоров для мониторинга состояния посевов и почвенных засух на территории Белорусского Поозерья. На основе анализа тренда индекса здоровья растений (VHI), отражающего температурно-влажностный стресс у растений, проанализированы изменения условий вегетации за период 2000–2024 гг.

Исходные данные и методы исследования. В ходе настоящего исследования разработана экспериментальная версия геоинформационной системы для картографирования и мониторинга состояния посевов и почвенных засух на территории Витебской области, занимающей большую часть Белорусского Поозерья, на основе данных дистанционного зондирования Земли и облачных вычислений.

Доступ к материалам спутниковой съемки и продуктам на ее основе осуществляется посредством облачной платформы Google Earth Engine (GEE), объединяющей обширный мультитременной каталог геопространственных данных и программные средства их обработки и анализа. Доступ и работа с данными на платформе GEE осуществляются через программный интерфейс пользователя на JavaScript или Python. Пользователи могут запрашивать и анализировать данные из общедоступного каталога или же загружать свои собственные данные. Все вычисления на платформе GEE производятся на серверах Google, что освобождает пользователя от необходимости задействовать свои вычислительные мощности и многократно сокращает время и затраты на обработку данных.

Разработанная информационная система основана на использовании данных радиометра среднего спектрального разрешения видимого и ближнего ИК-диапазонов MODIS на спутниковых платформах Terra и Aqua (NASA), спутникового микроволнового радиометра SMAP (NASA). Для выделения пахотных земель на спутниковых изображениях используется классификация почвенно-растительного покрова Global Land Cover 2019 (GLC2019) на основе результатов обработки данных спутникового сканера высокого спектрального разрешения PROBA-V Европейского Космического Агентства. Набор данных GLC2019 содержит 23 класса землепользования с пространственным разрешением 100 м и в достаточно полной мере отражает современную пространственную структуру ландшафтов Беларуси.

Для оценки состояния посевов используются результаты обработки данных MODIS – нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) и температура подстилающей поверхности (LST) для дневного и ночного времени суток, представленные на платформе GEE в виде информационных продуктов MOD13Q1.061 (16-дневные композиты NDVI с пространственным разрешением 250 м) и MOD11A2.061 (8-дневные композиты LST с разрешением 1 км). Каталог данных GEE также включает информационный продукт MOD09Q1.061, содержащий коэффициенты яркости подстилающей поверхности в каналах радиометра MODIS из красной (620–670 nm) и ближней ИК (841–876 nm) областей спектра (скорректированные на влияние атмосферы и прошедшие контроль качества), что позволяет рассчитывать NDVI с временным разрешением 8 суток и пространственным разрешением 250 м.

Выбор спектральных каналов для вычисления NDVI основан на свойстве зеленой растительности поглощать солнечное излучение в красном участке спектра и эффективно отражать его в ближнем ИК-диапазоне. Для зеленой растительности NDVI всегда принимает положительные значения и растет с увеличением фитомассы. При этом для оценки состояния растительности важным является не столько абсолютное значение NDVI, сколько его относительное положение на шкале от минимального до максимального за весь период наблюдений. Такую информацию предоставляет индекс состояния растительности VCI (Vegetation Condition Index), который сравнивает текущее значение NDVI с диапазоном его значений, наблюдавшихся в тот же период за предыдущие годы. VCI варьирует от 0 для крайне неблагоприятных условий до 1 для оптимальных условий. Для его вычисления используется следующая формула [8, 18]:

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}}, \quad (1)$$

где $NDVI_{\max}$ и $NDVI_{\min}$ – соответственно многолетние минимум и максимум NDVI для заданного пикселя на заданную дату (± 15 дней, учитывая разные даты начала вегетации для разных лет).

Температура подстилающей поверхности (LST) является результатом обработки измерений яркостной температуры на верхней границе атмосферы в двух спектральных каналах спутникового прибора MODIS из окна прозрачности атмосферы (10–12 мкм). Информационный продукт MOD11A2.061, представленный на платформе GEE, включает 8-дневные композитные карты дневной и ночной LST с пространственным разрешением 1 км. На его основе рассчитывается индекс температурных условий TCI (Temperature Condition Index), который используется для определения теплового стресса у растений. Текущие температурные условия оцениваются относительно максимальной и минимальной температур, которые наблюдались на заданную дату за прошлые годы. Для вычисления TCI используется следующая формула [9, 19]:

$$TCI = \frac{LST_{\max} - LST}{LST_{\max} - LST_{\min}}, \quad (2)$$

где $LST_{\min}$ и $LST_{\max}$ – соответственно максимальное и минимальное значение дневной температуры подстилающей поверхности за все годы ее измерений на заданную дату (± 15 дней, учитывая разную дату начала вегетации). Индекс TCI изменяется в диапазоне 0–1, где значение 0 означает крайне высокий риск температурного стресса растений.

Для спутникового мониторинга сельскохозяйственных засух часто используется индекс здоровья растений VHI (Vegetation Health Index), представляющий собой линейную комбинацию двух рассмотренных ранее индексов – VCI и TCI [20]:

$$VHI = \alpha VCI + (1 - \alpha) TCI, \quad (3)$$

где весовой коэффициент α задает вклады аномалий NDVI и LST в значение VHI и изменяется в зависимости от региона и климатических условий [21]. На практике значение весового коэффициента α чаще всего выбирается равным 0,5, что означает одинаковый вклад аномалии NDVI и температурного стресса растений в индекс VHI.

VHI изменяется от 0, что соответствует высокой степени засухи, до 1, что соответствует влажным или незасушливым условиям. Согласно существующей классификации VHI, значения $VHI \geq 0,50$ свидетельствуют об отсутствии засухи в районе, $VHI = 0,35-0,50$ – о слабой засухе, $VHI = 0,20-0,35$ – об умеренной засухе, $VHI = 0,10-0,20$ – о сильной засухе и $VHI \leq 0,10$ – об экстремальной засухе.

Для мониторинга почвенных засух важное значение также имеет аномалия влажности почвы. Современные оптические системы дистанционного зондирования Земли позволяют получать оценки влажности почвы по измерениям собственного теплового излучения Земли в микроволновом (СВЧ) диапазоне спектра. Микроволновое излучение с $\lambda > 1-2$ см практически не рассеивается безоблачной атмосферой и не поглощается атмосферными газами, а длины волн свыше 3–5 см способны беспрепятственно проходить через облака и туманы, что делает микроволновые измерения практически всепогодными.

Спутниковый микроволновой радиометр регистрирует уходящее излучение на верхней границе атмосферы, интегральной характеристикой которого является радиояркостная температура T_b . В СВЧ-диапазоне она пропорциональна произведению их термодинамической температуры и излучательной способности [22]. Термодинамическая температура земной поверхности (LST) определяется по результатам независимых измерений уходящего теплового излучения в окне прозрачности атмосферы в ИК-области спектра (10–12 мкм). При известной температуре подстилающей поверхности измерения радиояркостной температуры на верхней границе атмосферы позволяют оценить излучательную способность подстилающей поверхности и по ней вычислить влажность поверхностного слоя почвы. Увеличение влажности почвы приводит к уменьшению излучательной способности почвы, что отчетливо проявляется в значении радиояркостной температуры.

Это принцип определения влажности почвы по данным пассивного микроволнового зондирования из космоса реализован в спутниковом приборе NASA SMAP (Soil Moisture Active Passive), выведенном на околоземную орбиту в январе 2015 г. Данный прибор регистрирует уходящее микроволновое излучение

в L-диапазоне ($\nu = 1\text{--}2$ ГГц, $\lambda = 15\text{--}30$ см) в горизонтальной и вертикальной поляризациях. Поляризационные измерения радиояростной температуры выполняются с целью оценки оптической толщины растительного полога, влияющей на результат определения влажности почвы [23].

С целью валидации результатов дистанционных измерений влажности почвы спутниковым прибором SMAP проведено их сопоставление с данным реанализа ERA5-Land для территории Витебской области за период май – сентябрь 2015–2024 гг.

Посредством программного интерфейса GEE на Python случайным образом выбрано 50 точек, попадающих на пахотные земли Витебской области. Разновременные значения влажности почвы, полученные для выбранных точек за период май – сентябрь 2015–2024 гг. по данным SMAP и реанализа ERA5 сопоставлены на рис. 1. Цветом на нем показана плотность точек. Связь значений влажности почвы из двух рассматриваемых архивов данных описывается уравнением $ERA5 = 0,605 \text{ SMAP} + 0,198$ с коэффициентом корреляции $R = 0,60$.

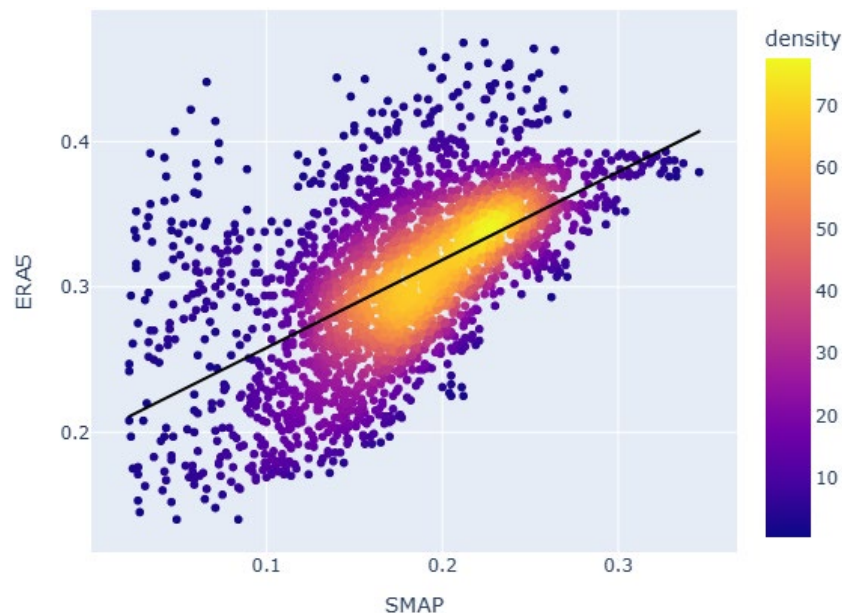


Рис. 1. Оценки влажности почвы, полученные для пахотных земель Витебской области спутниковым прибором SMAP в сравнении с данными реанализа ERA5 за период май – сентябрь 2015–2024 гг.

Fig. 1. Soil moisture estimates obtained for the croplands of the Vitebsk region by the SMAP satellite instrument in comparison with the ERA5 reanalysis data for May – September 2015–2024

Еще одним важным индикатором влажности почвы, предложенным авторами данной работы, является нормированная разница LST для дневного и ночного времени суток, характеризующая амплитуду суточных колебаний LST. Более влажные почвы из-за высокой удельной теплоемкости воды, как правило, являются более инерционными в плане температурных колебаний. Такие почвы меньше подвержены риску перегрева днем и медленнее выхолаживаются ночью. В этой связи разницу LST для дневного и ночного времени суток, приведенную к диапазону 0–1 с учетом ее минимального и максимального значений для заданного времени года, можно рассматривать в качестве индикатора тепловой инерции почвы, зависящей от ее увлажненности.

Для вычисления введенного нами индекса амплитуды суточных колебаний температуры подстилающей поверхности DTVI (Daily Temperature Variation Index) предложена следующая формула:

$$DTVI = \frac{\Delta LST_{\max} - \Delta LST_{\min}}{\Delta LST_{\max} - \Delta LST_{\min}}, \quad (4)$$

где ΔLST – разница между дневной и ночной LST, определяемая по данным MODIS; $\Delta LST_{\max}$ и $\Delta LST_{\min}$ – соответственно максимум и минимум ΔLST для заданного пикселя на заданную дату (± 15 дней) за весь период спутниковых измерений LST. Значение DTVI изменяется в диапазоне 0–1: со значением 0, означающим экстремально низкую тепловую инерцию почвы (высокую подверженность колебанию температуры на протяжении суток), и значением 1, означающим максимально высокую тепловую инерцию почвы с хорошей увлажненностью.

Индекс DTVI позволяет значительно уточнить оценку влажности почвы прибором SMAP. Простое уравнение линейной регрессии, включающее в качестве предикторов аномалию влажности почвы по данным SMAP (по сравнению с ее средним значением на заданную дату, начиная с 2015 г.) и индекс DTVI, позволяет повысить коэффициент корреляции оценок влажности почвы с данными ERA5 до 0,69. Еще более точных оценок влажности почвы можно достичь при включении в отмеченное уравнение регрессии сомножителей, учитывающих географическую зональность по долготе. Коэффициенты данного уравнения получены на основе близких по времени оценок влажности почвы прибором SMAP, дневной и ночной температур земной поверхности прибором MODIS и данных реанализа ERA5 за период май – сентябрь 2015–2024 гг. Синхронизация спутниковых информационных продуктов SMAP, MODIS и сеточных данных ERA5 выполнена на платформе GEE посредством программного интерфейса на Python. В качестве статистической выборки взяты те же 50 точек на пахотных землях Витебской области, что и для получения парной корреляции, показанной на рис. 1. С учетом статистического анализа полученных данных предлагается следующее уравнение для определения влажности почвы (SM) на пахотных землях Белорусского Поозерья по данным спутниковых приборов MODIS и SMAP:

$$SM = 1,540 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi\theta}{360} + 1,334 \right) \right] SMAP + 15,08 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi\theta}{360} - 3,496 \right) \right] DTVI, \quad (5)$$

где θ – долгота в градусах; SMAP – аномалия влажности почвы по данным прибора SMAP.

Расчеты влажности почвы по уравнению (5) сопоставлены с данными реанализа ERA5 на рис. 2. Коэффициент корреляции между сопоставляемыми значениями составляет 0,71, что свидетельствует о возможности вполне приемлемых для практических целей оценок влажности почвы по данным дистанционного зондирования Земли спутниковыми приборами SMAP и MODIS.

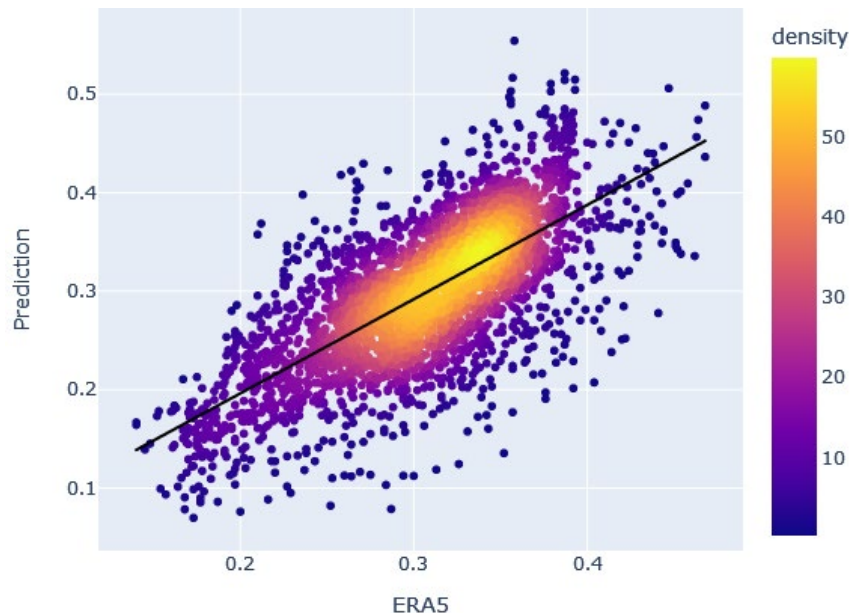


Рис. 2. Сопоставление результатов расчета влажности почвы по уравнению регрессии (5) с данными реанализа ERA5

Fig. 2. Comparison of soil moisture calculation results using regression equation (5) with ERA5 reanalysis data

Важно отметить, что поскольку температура подстилающей поверхности измеряется прибором MODIS с пространственным разрешением 1 км, то и итоговая влажность почвы, рассчитываемая по уравнению (5), также будет иметь разрешение ~1 км, что значительно выше, чем у прибора SMAP (~9 км). Таким образом, измерения дневной и ночной LST позволяют не только улучшить точность определения влажности почвы, но и почти на порядок повысить пространственное разрешение. Присутствие в уравнении регрессии (5) сомножителей, зависящих от долготы, позволяет скорректировать весовые вклады SMAI и DTVI с учетом географической зональности и континентальности климата.

В разработанной системе спутникового мониторинга засух использованы данные двух спутниковых приборов NASA (MODIS и SMAP) и маска пахотных земель из глобальной классификации подстилающей поверхности GLC2019. На основе этих данных рассчитаны и отображены на интерактивных картах индексы состояния растительности (VCI) с разрешением 250 м, температурных условий (TCI) с разрешением 1 км, здоровья растительности (VHI) с разрешением 250 м, суточных вариаций температуры подстилающей поверхности (DTVI) с разрешением 1 км, влажность слоя почвы 0–5 см по данным SMAP с разрешением 9 км и влажность слоя почвы 0–5 см по совместным данным SMAP и MODIS с разрешением 1 км, которая также нормируется в виде индекса SMAI (Soil Moisture Anomaly Index) к диапазону 0–1.

Разработанная система позволяет анализировать как последние актуальные данные дистанционного зондирования Земли с целью оценки текущих условий вегетации, так и исторические архивы спутниковой информации с целью анализа трендов и изменений вегетационных и температурно-влажностных индексов пахотных земель для разных месяцев вегетационного периода.

Анализ вышеуказанных спутниковых индексов наряду с наземной метеорологической информацией предоставляет комплексную информацию о всех стадиях наступления и развития засухи – атмосферной, почвенной, сельскохозяйственной. Для выявления атмосферной засухи можно использовать стандартные индексы дефицита осадков, такие как стандартизированный индекс осадков (SPI – Standardized Precipitation Index). Индексы аномалии влажности почвы (SMAI), тепловых условий (TCI) и суточных вариаций температуры подстилающей поверхности (DTVI) помогают оценить масштаб и интенсивность почвенной засухи. Индексы состояния (VCI) и здоровья (VHI) растительности позволяют судить о водном стрессе сельскохозяйственных культур, вызванном дефицитом почвенной влаги, оценивать процент пахотных земель, охваченных засухой разной степени интенсивности и прогнозировать ее влияние на состояние посевов.

Анализ трендов вегетационных и температурно-влажностных индексов пахотных земель на разных уровнях статистической значимости позволяет выявить наиболее уязвимые к изменению климата территории, требующие первоочередного внимания в части адаптации к новым агроклиматическим условиям. Для обнаружения трендов во временных рядах вегетационных и температурно-влажностных индексов используется непараметрический тест Манна – Кендалла. Данный тест позволяет принимать или отвергать (при заданном уровне значимости α) нулевую гипотезу H_0 об отсутствии тренда во временном ряду на основании статистик (S и Z), рассчитываемых по разностям между увеличивающимися или уменьшающимися парами значений в исследуемом временном ряду.

S -статистика вычисляется следующим образом:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k), \quad (6)$$

где n – длина временного ряда; X_k и X_j – значения во временном ряду, соответствующие меткам времени k и $j > k$:

$$\text{sgn}(X_j - X_k) = \begin{cases} -1, & \text{при } X_j < X_k \\ 0, & \text{при } X_j = X_k \\ 1, & \text{при } X_j > X_k \end{cases}. \quad (7)$$

Положительное значение S указывает на возрастание значений во временном ряду, а отрицательные – на их убывание. При $n \geq 9$ распределение S примерно подчиняется нормальному распределению со средним нулевым значением и стандартным отклонением:

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right], \quad (8)$$

где g – количество подмножеств временного ряда, состоящих из одинаковых элементов; t_p – количество элементов в подмножестве p .

Стандартизация S -статистики дает Z -статистику с нулевым средним и единичным стандартным отклонением:

$$Z = \begin{cases} (S+1)/\sqrt{\text{VAR}(S)}, & \text{при } S < 0 \\ 0, & \text{при } S = 0 \\ (S-1)/\sqrt{\text{VAR}(S)}, & \text{при } S > 0 \end{cases}. \quad (9)$$

Полученное значение Z сравнивается с теоретическим распределением, полученным Манном и Кендаллом. Нулевая гипотеза (об отсутствии тренда) отвергается в том случае, когда найденное значение Z превышает теоретические пороги $Z_{1-\alpha/2}$ (при двусторонней альтернативе) или $Z_{1-\alpha}$ (при односторонней альтернативе), соответствующий уровню статистической значимости α .

Для вычисления коэффициента линейного тренда используется непараметрический метод Тейла – Сена, который для множества точек на плоскости (t_i, z_i) определяет наклон тренда как медиану m коэффициентов $(z_j - z_i) / (t_j - t_i)$ по всем парам точек выборки (временного ряда). Данный метод менее чувствителен к выбросам и аномалиям в данных и лучше подходит для несимметричных и гетероскедастичных данных, чем стандартный метод наименьших квадратов.

Апробация спутниковых индексов для территории Белорусского Поозерья. Рассмотрим примеры использования вышеописанных спутниковых индексов для оценок влажности почвы и состояния посевов в нормальных и засушливых условиях.

Для сравнения взято два периода – 01.06.2022–15.06.2022 и 01.06.2023–15.06.2023, существенно отличающихся по сумме атмосферных осадков, выпавших на территории Витебской области. В июне 2022 г. на ее территории выпало 89,2 мм атмосферных осадков, или 117 % от нормы, а в июне 2023 г. – 29,5 мм, или 39 % от нормы. Июнь 2023 г. по количеству атмосферных осадков в Витебской области занял второе место в ранжированном ряду наблюдений от самого засушливого к самому влажному, начиная с 1945 г.

На рис. 3 приведены карты влажности почвы по данным спутникового микроволнового радиометра SMAP, индекса суточных вариаций температуры подстилающей поверхности (DTVl) и индекса аномалии влажности почвы (SMAI – Soil Moisture Anomaly Index), рассчитанного по объединенным данным спутниковых приборов SMAP и MODIS для июня 2022 г. Из рис. 3, а видно, что объемное содержание воды в слое почвы 0–5 см в указанный период было не ниже 20 %, а на севере области доходило до 30–35 %. Индекс DTVl на пахотных землях области был значительно выше среднего значения, а в отдельных районах достигал максимальных значений (см. рис. 3, б). Высокие значения индекса DTVl означают высокую тепловую инерцию почвы (малую амплитуду суточных колебаний LST), связанную с ее хорошим увлажнением.

Оценки влажности почвы и индекса DTVl позволяют по формуле (5) рассчитать индекс аномалии влажности почвы SMAI с разрешением ~1 км. Карта распределения этого индекса по пахотным землям Витебской области представлена на рис. 3, в. Высокая положительная аномалия SMAI говорит о достаточно хорошей увлажненности почвы на всей территории области.

Аналогичные карты SMAP, DTVl и SMAI, но для засушливого периода 2023 г., представлены на рис. 4. Видно, что здесь ситуация полностью противоположна той, что отмечалась для июня 2022 г. Влажность почвы по данным прибора SMAP (см. рис. 4, а) на большей части области меньше 10–15 %, а на юго-востоке области – меньше 5 %, что говорит о высоком дефиците почвенной влаги.

Низкие значения индекса DTVl (см. рис. 4, б) указывают на малую теплоемкость почвы, связанную с малым объемным содержанием в ней воды. При этом согласно распределению индекса DTVl наиболее критичной ситуация с засухой обострялась на западе области, что также подтверждается расчетами индекса аномалии влажности почвы, показанного на рис. 4, в. Значения SMAI < 0,1, наблюдаемые в западной части области, указывают на чрезвычайно сильный дефицит почвенной влаги, вызванный длительной атмосферной засухой.

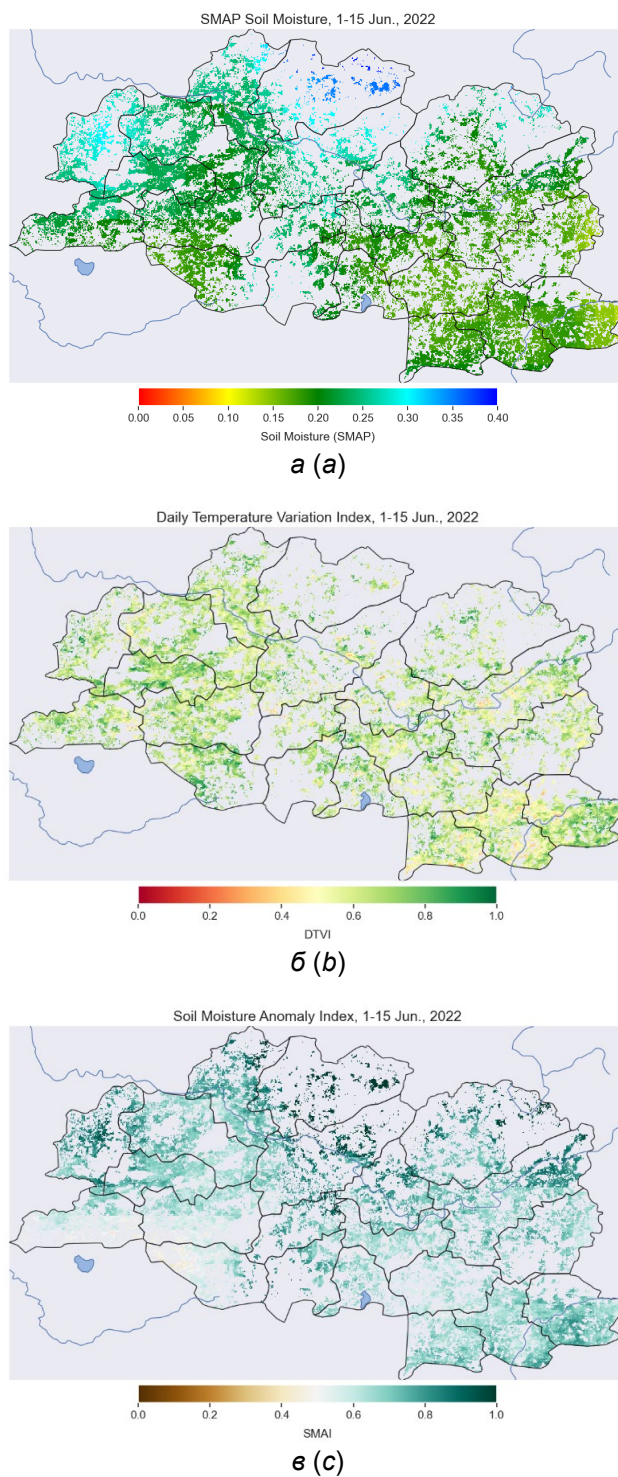


Рис. 3. Карты распределений влажности почвы по данным SMAP (а), индекса суточных вариаций LST по данным MODIS (б) и аномалии влажности почвы по объединенным данным SMAP и MODIS (в) за период за период 1–15 июня 2022 г.

Fig. 3. Maps of soil moisture distributions from SMAP data (a), daily temperature variation index from MODIS data (b), and soil moisture anomaly from combined SMAP and MODIS data (c) for the period June 1–15, 2022

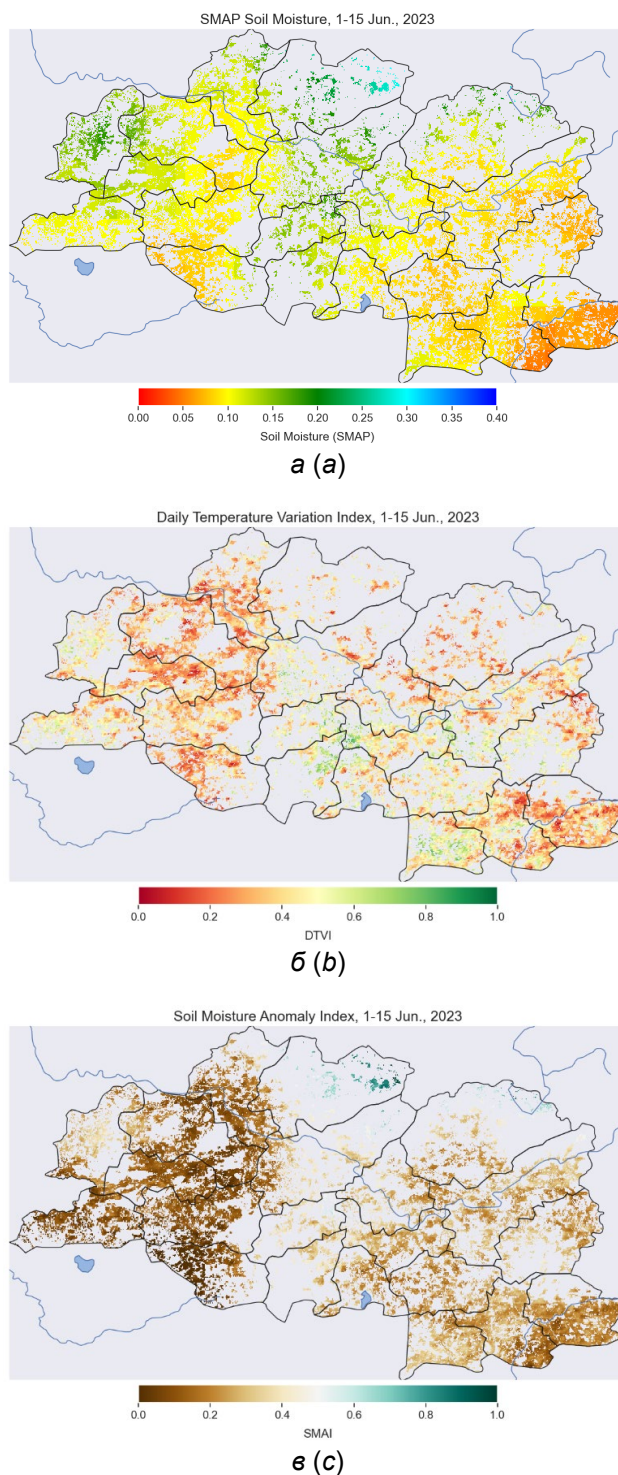


Рис. 4. Карты распределений влажности почвы по данным SMAP (а), индекса суточных вариаций LST по данным MODIS (б) и аномалии влажности почвы по объединенным данным SMAP и MODIS (в) за период 1–15 июня 2023 г.

Fig. 4. Maps of soil moisture distributions from SMAP data (a), daily temperature variation index from MODIS data (b), and soil moisture anomaly from combined SMAP and MODIS data (c) for the period June 1–15, 2023

О влиянии почвенной засухи на состояние посевов можно судить по картам распределения индекса здоровья растений (VHI), представленным на рис. 5. В период с нормальным увлажнением почвы (июнь 2022 г.) значения VHI для большинства сельскохозяйственных полей выше его среднего значения за предыдущие годы (за исключением отдельных полей, на которых отрицательные аномалии VHI могут быть связаны со сменой выращиваемых культур в рассматриваемый год).

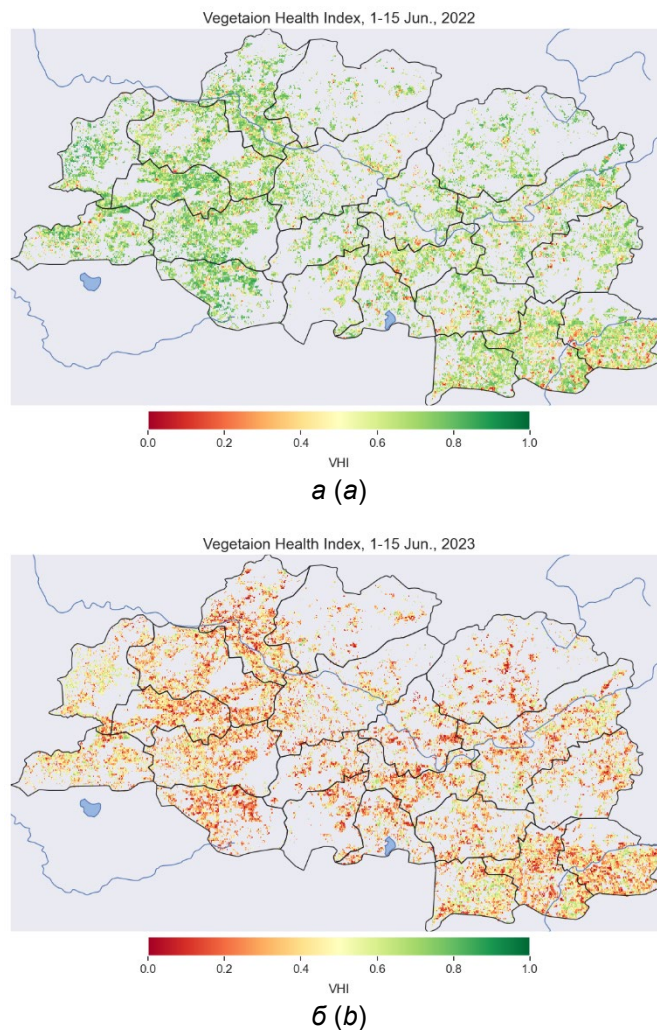


Рис. 5. Карты распределений индекса здоровья растений (VHI) на территории Витебской области для нормального (а) и засушливого (б) периодов

Fig. 5. Maps of the Vegetation Health Index (VHI) in the Vitebsk region for normal (a) and dry (b) periods

Из рис. 5, б видно, что в условиях почвенной засухи значения VHI находятся в левой части шкалы его значений. Достаточно сильная засуха в июне 2023 г. заметно повлияла на состояние посевов: VHI опустился до минимальных значений, что говорит о мощном стрессе растений, вызванном высокими температурами и дефицитом почвенной влаги.

Таким образом, на основании анализа карт спутниковых индексов SMAP, DTVI, SMAI и VHI можно с высокой степенью объективности выявлять и отслеживать все стадии наступления засухи и ее влияние на состояние посевов и тем самым прогнозировать возможные потери урожая и ущерб, связанный с опасными погодными явлениями. Важной возможностью данного метода является объективная оценка процента пахотных земель области, подверженных почвенной или сельскохозяйственной засухам различной интенсивности.

Анализ долгосрочных изменений индекса здоровья растений на землях Белорусского Поозерья. Для понимания долгосрочных изменений условий вегетации на территории Белорусского Поозерья рассмотрим тренды индекса здоровья растений для пахотных земель Витебской области. Тренды VHI рассчитывали для каждого месяца с мая по сентябрь, основываясь на данных спутникового прибора MODIS за 2000–2024 гг. Статистическую значимость трендов оценивали согласно тесту Манна – Кендалла на уровне $\alpha = 0,05$. Коэффициент наклона линейного тренда оценивали по методу Тейла – Сена. Карты коэффициента линейного тренда VHI приведены для разных месяцев вегетационного периода на рис. 6 и 7.

В мае в Витебской области статистически значимое повышение VHI отмечается для 17,5 % пахотных земель, а статистически значимое понижение VHI – для 8,2 % земель (см. рис. 6, а), что говорит об улучшении агроклиматических условий в мае за счет более раннего начала вегетации и большей теплообеспеченности территории области.

Ситуация с изменением агроклиматических условий для июня обстоит совершенно иначе (см. рис. 6, б). Статистически достоверный рост среднего для июня индекса VHI отмечается лишь на 4 % пахотных земель, а статистически достоверное понижение VHI – для 21 % пахотных земель. Таким образом, рост температуры воздуха и усиление засушливости климата в июне уже, очевидно, начали оказывать негативное влияние на состояние сельскохозяйственных культур и далее отмеченные тенденции с большой вероятностью будут только усиливаться.

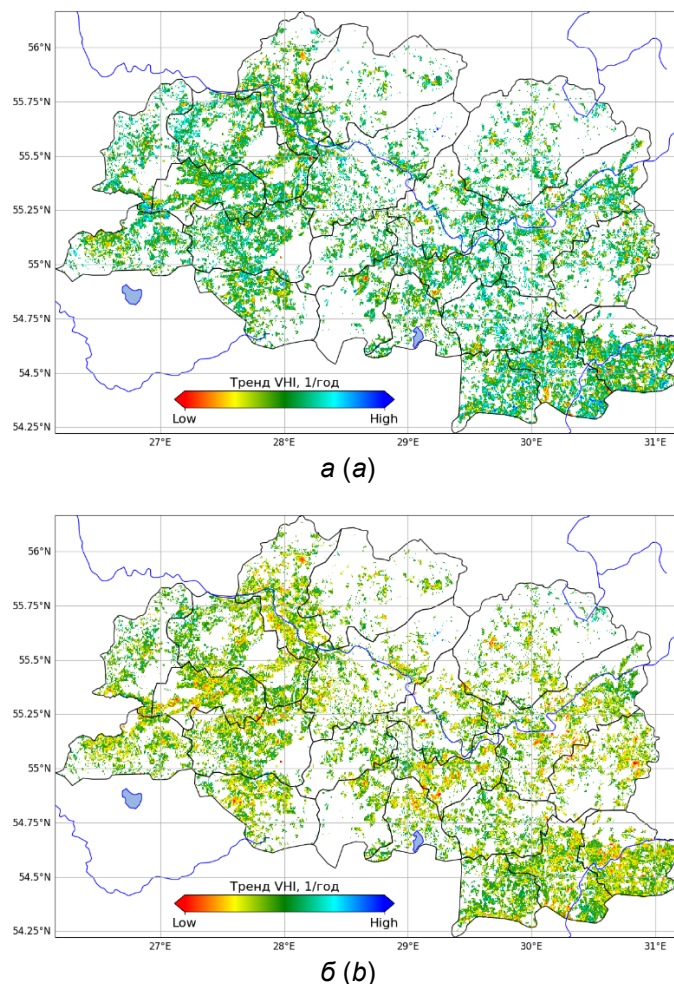


Рис. 6. Карта коэффициента линейного тренда среднего для мая (а) и июня (б) индекса здоровья растений на пахотных землях Витебской области

Fig. 6. Map of the linear trend coefficient of the average vegetation health index for May (a) and June (b) in the croplands of the Vitebsk region

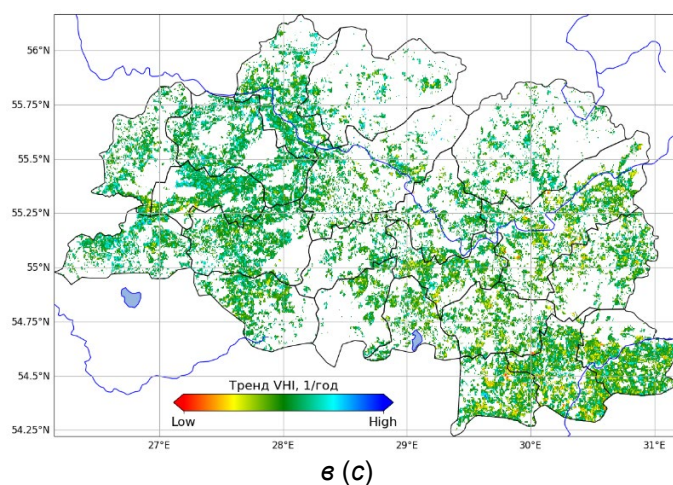
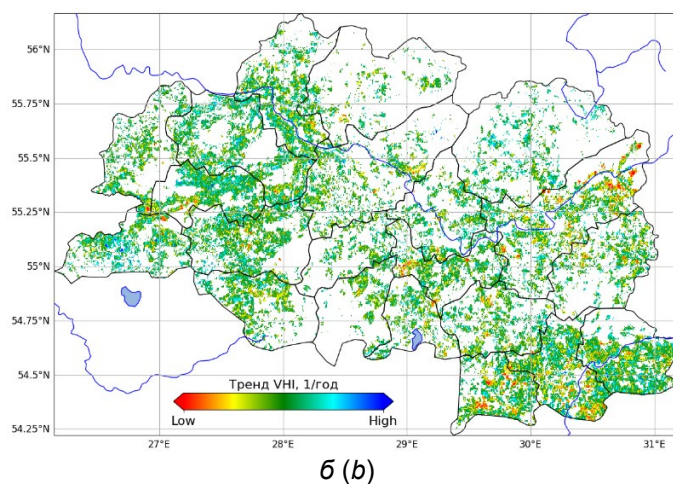
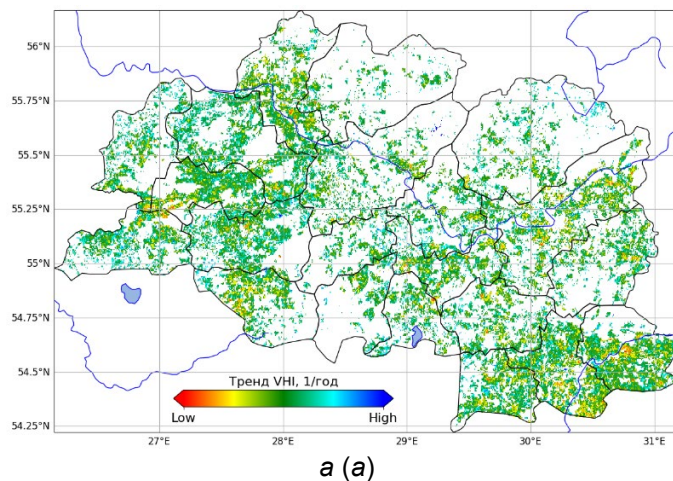


Рис. 7. Карта коэффициента линейного тренда среднего для июля (а), августа (б) и сентября (в) индекса здоровья растений на пахотных землях Витебской области

Fig. 7. Map of the linear trend coefficient of the average for July (a), August (b) and September (c) of the plant health index on arable lands of the Vitebsk region

Распределения трендов VHI на пахотных землях Витебской области для июля, августа и сентября представлены на рис. 7. В июле статистически достоверный рост VHI имеет место для 12 % пахотных земель, статистически достоверное понижение VHI – для 8 %. Отрицательным трендом VHI в большей степени охвачена восточная часть области (см. рис. 7, а), что является следствием более частого возникновения и увеличения продолжительности блокирующих антициклонов над Европейской территорией России в июле – августе.

Пространственное распределение тренда VHI для августа (см. рис. 7, б) также показывает ухудшение агроклиматических условий для сельскохозяйственных культур в восточной части Витебской области, однако в целом по области изменение агроклиматических условий улучшает состояние растений: доли пахотных земель со статистически значимыми положительными и отрицательными трендами VHI составляют 17 и 6 % соответственно.

Отрицательные тренды среднего для сентября VHI отмечаются в основном на востоке области, в западной ее части VHI увеличивается. В целом по области доля пахотных земель со статистически достоверным положительным трендом VHI для сентября составляет 17,5 %, тогда как статистически достоверный отрицательный тренд VHI охватывает лишь 3,8 % пахотных земель.

Закключение. Современные средства дистанционного зондирования Земли и облачные технологии анализа разновременных геопространственных данных позволяют объективно оценивать распределения почвенной и сельскохозяйственной засух различной интенсивности и тем самым прогнозировать возможные потери урожая и ущерб в масштабах всего государства. Для более точной и детализированной геопространственной оценки влажности поверхностного слоя почвы по данным микроволнового зондирования Земли необходимы дополнительные измерения дневной и ночной температур подстилающей поверхности и получение калибровочного уравнения, устанавливающего связь косвенных индикаторов влажности почвы с результатами ее полевых измерений (в отсутствии таковых для этой цели может использоваться реанализ ERA5-Land). Сопоставление текущих оценок влажности почвы, вегетационного индекса и температуры подстилающей поверхности с их минимальными и максимальными значениями для заданного времени года позволяет определить категорию засухи (от слабой до экстремальной) и процент охваченных ею сельскохозяйственных земель.

Анализ многолетних изменений индекса здоровья растений (VHI), рассчитываемого по соотношениям вегетационного индекса NDVI и температуры подстилающей поверхности с их минимальными и максимальными значениями, показывает, что на территории Белорусского Поозерья происходят заметные изменения условий вегетации, выражающиеся в усилении температурного и водного стресса у растений в отдельные фазы вегетационного периода.

Наибольшее ухудшение условий вегетации на всей территории Белорусского Поозерья отмечается для июня. Доля пахотных земель Витебской области со статистически достоверным отрицательным трендом VHI для этого месяца составляет 21 %.

В июле и августе отрицательные последствия изменения климата, связанные с более частым образованием мощных блокирующих антициклонов над Европейской территорией России, проявляются преимущественно в восточной части Витебской области, где отмечается статистически значимое понижение VHI. В западной части области тренды VHI в основном положительные, что говорит об улучшении температурно-влажностных условий вегетации.

Отмеченные в работе геопространственные особенности влияния изменений климата на состояние сельскохозяйственных растений на территории Белорусского Поозерья в различные месяцы вегетационного периода могут использоваться для оптимизации структуры посевных площадей с целью более эффективного использования нового агроклиматического потенциала области и для разработки стратегии адаптации сельского хозяйства к изменению климата.

Полученные результаты исследований использованы при выполнении задания «Выполнить типизацию почв сельскохозяйственных земель Белорусского Поозерья по степени уязвимости к климатическим изменениям и предложить систему адаптивных мероприятий по снижению их негативных последствий в регионе» подпрограммы 01 «Устойчивое природопользование, инновационные технологии переработки, охраны и воспроизводства природных ресурсов» государственной научно-технической программы «Зеленые технологии ресурсопользования и экобезопасности», 2021–2025 гг.

Список использованных источников

1. Признаки аридизации климата и их экосистемные проявления на территории Беларуси / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. С. Хомич [и др.] // Известия РАН. Серия географическая. – 2021. – Т. 85, № 4. – С. 515–527.
2. Лысенко, С. А. Влияние изменений климата на биопродуктивность наземных экосистем в Белорусско-Украинском Полесье / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов, П. О. Зайко // Метеорология и гидрология. – 2022. – Т. 47, № 1. – С. 59–71.
3. Лысенко, С. А. Численное моделирование микроклимата повторно заболачиваемых земель Белорусского Полесья / С. А. Лысенко // Доклады НАН Беларуси. – 2024. – Т. 68, № 3. – С. 238–246.
4. Лысенко, С. А. Оценки современных изменений биоклиматических параметров почвенно-растительного покрова Гомельской области / С. А. Лысенко, М. А. Хитриков // Природные ресурсы. – 2024. – № 2. – С. 17–29.
5. Логинов, В. Ф. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – Изд. 2-е. – Минск : Энциклопедикс, 2020. – 264 с.
6. Lysenko, S. A. Scenario forecasts of the climate change in Belarus based on regionally adapted ensembles of CMIP6 climate models / S. A. Lysenko // Russian Meteorology and Hydrology. – 2025. – Vol. 50. – P. 584–595.
7. Hanes, J. M. Biophysical applications of satellite remote sensing / J. M. Hanes, X. Zhang, W. Ni-Meister. – Berlin, Heidelberg : Springer, 2014. – 230 p.
8. Tang, H. Quantitative remote sensing in thermal infrared / H. Tang, Z. Li. – Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2014. – 281 p.
9. Contribution of Land Surface Temperature (T_{CI}) to Vegetation Health Index: A comparative study using clear sky and all-weather climate data records / V. Bento, I. F. Trigo, C. Gouveia, C. C. Dacamara // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10, № 9. – P. 13–24.
10. Holzman, M. E. Subsurface soil moisture estimation by VI-LST method / M. E. Holzman, R. Rivas, M. Bayala // IEEE Geoscience and remote sensing letters. – 2014. – Vol. 11, № 11. – P. 1951–1955.
11. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations / A. Karnieli, N. Agam, R. Pinker [et al.] // Journal of Climate. – 2010. – Vol. 23, № 3. – P. 618–633.
12. Soil moisture estimation with microwave remote sensing: a systematic review and meta-analysis / N. Xu, A. Daccache, A. Ahmadi [et al.] // International Journal of Digital Earth. – 2025. – Vol. 18, № 1. – P. 1–27.
13. Soil moisture retrieval techniques using satellite remote sensing / A. K. Kasaragod, R. Setia, D. K. Pandey [et al.] // Geospatial Technologies for Crops and Soils / T. Mitran, R. S. Meena, A. Chakraborty (eds). – Singapore : Springer, 2020. – P. 357–385.
14. An inclusive approach to crop soil moisture estimation: Leveraging satellite thermal infrared bands and vegetation indices on Google Earth engine / F. Imtiaz, A. A. Farooque, G. S. Randhawa [et al.] // Agricultural Water Management. – 2024. – Vol. 306, № 6.
15. Li, S. Regional soil moisture estimation leveraging multi-source data fusion and automated machine learning / S. Li, P. Zhu, N. Song, C. Li, J. Wang // Remote Sensing. – 2025. – Vol. 17. – P. 837.
16. Soil moisture estimates at 1 km resolution making a synergistic use of sentinel data / R. Madelon, N. J. Rodriguez-Fernandez, H. H. Bazzi [et al.] // Hydrology and Earth System Sciences. – 2023. – Vol. 27, № 6. – P. 1221–1242.
17. Клещенко, А. Д. Оценка возможности использования спутниковой информации для мониторинга засух на территории южных регионов России / А. Д. Клещенко, О. В. Савицкая // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2024. – № 3 (393). – С. 142–157.
18. Kogan, F. N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas / F. N. Kogan // International Journal of Remote Sensing. – 1990. – Vol. 11, № 8. – P. 1405–1419.
19. Kogan, F. N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection / F. N. Kogan // Advances in Space Research. – 1995. – Vol. 15, № 11. – P. 91–100.
20. Kogan, F. N. World droughts in the new millennium from AVHRR-based vegetation health indices / F. N. Kogan // EOS Transactions of the American Geophysical Union. – 2002. – Vol. 83, № 48. – P. 557–563.
21. An improved global vegetation health index dataset in detecting vegetation drought / J. Zeng, T. Zhou, Y. Qu [et al.] // Scientific Data. – 2023. – Vol. 10, iss. 1. – P. 338.
22. Jackson, T. J. Vegetation effects on the microwave emission from soils / T. J. Jackson, T. J. Schmugge // Remote Sensing of Environment. – 1991. – Vol. 36. – P. 203–212.
23. SMAP handbook – soil moisture active passive: Mapping soil moisture and freeze/thaw from space / D. Entekhabi, S. Yueh, P. O'Neill [et al.] ; SMAP Project, Jet Propulsion Laboratory. – Pasadena, CA, 2014. – 211 p.

References

1. Loginov V. F., Lysenko S. A., Khomich V. S. et al. *Priznaki aridizatsii klimata i ih ekosistemnye proyavleniya na territorii Belarusi* [Signs of climate aridization and their ecosystem manifestations on the territory of Belarus]. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, 2021, vol. 85, no. 4, pp. 515–527. (in Russian)
2. Lysenko S. A., Loginov V. F., Zaiko P. O. *Vliyanie izmenenij klimata na bioproduktivnost' nazemnykh ekosistem v Belorussko-Ukrainskom Poles'e* [Climate change impacts on bioproductivity of terrestrial ecosystems in the Belarusian-Ukrainian Polesie region]. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*, 2022, no. 1, pp. 59–71. (in Russian)
3. Lysenko S. A. *Chislennoe modelirovanie mikroklimata povtorno zabolachivaemykh zemel' Belorusskogo Poles'ya* [Numerical modeling of microclimate of re-waterlogged lands of Belarusian Polesie]. *Doklady Nacional'noj akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2024, vol. 68, no. 3, pp. 238–246. (in Russian)
4. Lysenko S. A., Khitrykau M. A. *Ocenki sovremennykh izmenenij bioklimaticheskikh parametrov pochvenno-rastitel'nogo pokrova Gomel'skoj oblasti* [Estimation of modern changes in the bioclimatic characteristics of the soil and plant cover of the Homiel region]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2024, no. 2, pp. 17–29. (in Russian)
5. Loginov V. F., Lysenko S. A., Melnik V. I. *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate change in Belarus: causes, consequences, and control possibilities]. 2nd ed., Minsk, Encyclopedics Publ., 2020, 264 p. (in Russian)
6. Lysenko S. A. Scenario forecasts of the climate change in Belarus based on regionally adapted ensembles of CMIP6 climate models. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2025, vol. 50, pp. 584–595.
7. Hanes J. M., Zhang X., Ni-Meister W. *Biophysical applications of satellite remote sensing*, Berlin, Heidelberg, Springer Publ., 2014, 230 p.
8. Tang H., Li Z. *Quantitative remote sensing in thermal infrared*. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag Publ., 2014, 281 p.
9. Bento V., Trigo I. F., Gouveia C., Dacamara C. C. Contribution of Land Surface Temperature (T_{CL}) to Vegetation Health Index: A comparative study using clear sky and all-weather climate data records. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, no. 9, pp. 13–24.
10. Holzman M. E., Rivas R., Bayala M. Subsurface soil moisture estimation by VI-LST method. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, vol. 11, no. 11, pp. 1951–1955.
11. Karnieli A., Agam N., Pinker R. et al. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. *Journal of Climate*, 2010, vol. 23, no. 3, pp. 618–633.
12. Xu N., Daccache A., Ahmadi A. et al. Soil moisture estimation with microwave remote sensing: a systematic review and meta-analysis. *Int. J. Digit. Earth*, 2025, vol. 18, no. 1, pp. 1–27.
13. Kasaragod A. K., Setia R., Pandey D. K. et al. Soil moisture retrieval techniques using satellite remote sensing. Mitran T., Meena R. S., Chakraborty A. (eds). *Geospatial technologies for crops and soils*. Singapore, Springer Publ., 2020, pp. 357–385.
14. Imtiaz F., Farooque A. A., Randhawa G. S. et al. An inclusive approach to crop soil moisture estimation: Leveraging satellite thermal infrared bands and vegetation indices on Google Earth Engine. *Agricultural Water Management*, 2024, vol. 306, no. 6.
15. Li S., Zhu P., Song N., Li C., Wang J. Regional soil moisture estimation leveraging multi-source data fusion and automated machine learning. *Remote Sensing*, 2025, vol. 17, p. 837.
16. Madelon R., Rodriguez-Fernandez N. J., Bazzi H. H. et al. Soil moisture estimates at 1 km resolution making a synergistic use of sentinel data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 1221–1242.
17. Kleshchenko A. D., Savitskaya O. V. *Ocenka vozmozhnosti ispol'zovaniya sputnikovoj informacii dlya monitoringa zasuh na territorii yuzhnykh regionov Rossii* [Assessment of the possibility of using satellite information for monitoring droughts in the southern regions of Russia]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy = Hydrometeorological Research and Forecasts*, 2024, no. 3 (393), pp. 142–157. (in Russian)
18. Kogan F. N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, vol. 11, no. 8, pp. 1405–1419.
19. Kogan F. N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 1995, vol. 15, no. 11, pp. 91–100.
20. Kogan F. N. World droughts in the new millennium from AVHRR-based vegetation health indices. *EOS Transactions of the American Geophysical Union*, 2002, vol. 83, no. 48, pp. 557–563.
21. Zeng J., Zhou T., Qu Y. et al. An improved global vegetation health index dataset in detecting vegetation drought. *Scientific Data*, 2023, vol. 10, iss. 1, p. 338.
22. Jackson T. J., Schmugge T. J. Vegetation effects on the microwave emission from soils. *Remote Sensing of Environment*, 1991, vol. 36, pp. 203–212.
23. Entekhabi D., Yueh S., O'Neill P. et al. SMAP handbook – soil moisture active passive: Mapping soil moisture and freeze/thaw from space. *SMAP Project*, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, 2014, 211 p.

Информация об авторах

Лысенко Сергей Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, директор, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: lysenko.nature@gmail.com

Мельник Виктор Иванович – ведущий научный сотрудник, кандидат географических наук, доцент, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: v.melnik2016@mail.ru

Буяков Иван Васильевич – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь)

Information about the authors

Sergey A. Lysenko – D. Sc. (Physical and Mathematical), Professor, Director, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: lysenko.nature@gmail.com

Viktar I. Melnik – Ph. D. (Geography), Leading Researcher, Associate Professor, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: v.melnik2016@mail.ru

Ivan V. Buyakov – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus)