

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2025-1-51-63>
УДК 528.854+911.2

Поступила в редакцию 30.03.2025
Received 30.03.2025

ВЫЯВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ СОЛИГОРСКОГО КАЛИЙНОГО КОМБИНАТА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Цзян Чэнь, А. Н. Червань

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Исследована структура землепользования в горнодобывающем районе Солигорского калийного комбината в Беларуси по данным дистанционного зондирования (ДДЗ) для учета процессов деградации земельных и почвенных ресурсов. Выполнен анализ пространственно-временных характеристик пяти групп видов земель (пахотных, лесных, луговых земель, болот и водоемов) с использованием четырех вегетационных индексов (нормализованного индекса растительности NDVI, зеленого нормализованного индекса растительности GNDVI, почвенно-регулируемого индекса растительности SAVI и зеленого хлорофиллового индекса GCI). Исследование проводилось по 9 территориальным блокам в программной среде ArcGIS. Результаты позволили уточнить модели дешифрирования структуры землепользования на основе долевого участия групп видов земель. Оценена динамика вегетативных индексов в течение вегетативного периода. Коэффициенты детерминации (R^2) индексов для лесных, пахотных и луговых земель составили ряд $NDVI (0,78–0,82) > GNDVI (0,75–0,80) > SAVI (0,73–0,79) > GCI (0,69–0,77)$. Пространственный анализ по индексам NDVI и GNDVI указывает на существенное влияние содержания влаги в почве в границах луговых земель, роль интенсивности сельскохозяйственной деятельности на пахотных землях, а также недостаточную чувствительность индекса SAVI для дешифрирования водоемов и болот. Анализ динамики индексов NDVI, GNDVI, SAVI и GCI позволил оценить пространственную неоднородность землепользования в горнодобывающем районе для последующего анализа процессов деградации земельных и почвенных ресурсов.

Ключевые слова: вегетационные индексы; дешифрирование; землепользование; вид земель; деградация почв.

Для цитирования. Цзян Чэнь, Червань А. Н. Выявление структуры землепользования в зоне влияния Солигорского калийного комбината по данным дистанционного зондирования // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 51–63.

IDENTIFICATION OF LAND USE STRUCTURE IN THE ZONE OF INFLUENCE OF THE SOLIGORSK POTASH PLANT BASED ON REMOTE SENSING DATA

Jiang Chen, A. N. Chervan

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. The spatiotemporal characteristics of five land use types – arable land, forests, meadows, wetlands and water bodies – over an area of 8100 km² in the influence zone of the Soligorsk Potash Plant in Belarus using four vegetation indices (NDVI, GNDVI, SAVI and GCI) based on Sentinel-2A remote sensing data (March – September 2023) are analyzed in the article. The study was conducted on nine territorial blocks in the ArcGIS environment with the accuracy of land type interpretation using the weighted average method for 900 representative plots. The obtained results made it possible to refine the models for interpreting land use structure based on the share of land types, as well as the dynamics of vegetation indices during the growing season. The coefficients of determination (R^2) of the four vegetation indices for forest, arable and meadow lands are as follows: $NDVI (0.78–0.82) > GNDVI (0.75–0.80) > SAVI (0.73–0.79) > GCI (0.69–0.77)$. Spatial analysis of the NDVI and GNDVI indices specifies a significant influence of soil moisture within the boundaries of meadow lands, the role of agricultural intensity on arable lands and insufficient sensitivity of the SAVI index for interpreting water bodies and wetlands. The research results made it possible to assess the spatial heterogeneity of land use in the mining region for subsequent analysis of land and soil resource degradation processes.

Keywords: vegetation indices; decoding; land use; land type; soil degradation.

For citation. Jiang Chen, Chervan A. N. Identification of land use structure in the zone of influence of the Soligorsk potash plant based on remote sensing data. *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 51–63.

Введение. Калийные ресурсы Беларуси играют решающую роль в сельскохозяйственном производстве и продовольственной безопасности на национальном и региональном уровне. Способствуя экономическому развитию, добыча калийных солей может оказывать неблагоприятное воздействие на экосистемы, особенно в связи с химической нагрузкой на почвы и растительный покров [1]. Индексы растительности, такие как нормализованный индекс растительности NDVI, нормализованный индекс зеленой растительности GNDVI, индекс растительности с поправкой на почву SAVI и индекс зеленого полога GCI как средство экологического и природоохранного мониторинга на основе технологии дистанционного зондирования позволяют количественно оценить состояние растительности с целью определения воздействия горных разработок на окружающую среду [2]. Горные разработки способствуют усилению эрозии почв, нарушению экологического баланса, химическому загрязнению окружающей среды, что приводит к деградации земель, снижению качества почв, сокращению биоразнообразия и т. д. [3]. Основной акцент представленных исследований сделан на определении структуры землепользования по данным дистанционного зондирования (ДДЗ) для формирования пространственной основы учета проявления деградации почвенного покрова и земельных ресурсов [4].

Объект и методы исследования. Основанный в 1958 г. в Солигорском районе «Белорусский калийный комбинат» производит около седьмой части мирового объема калийных удобрений [5]. В настоящее время действуют шесть калийных рудников и четыре перерабатывающих завода с годовым объемом производства 11,71 млн т, что составляет 17 % от общего мирового производства калийных удобрений и является третьим по величине в мире, с планами увеличения производства до 15,9 млн т в 2025 г. [6]. Процесс флотации для извлечения калийных минералов путем физического разделения и химического воздействия может сопровождаться просачиванием в почвенную среду химических соединений вместе со сточными водами и твердыми отходами. Хвостохранилища в горнодобывающем районе занимают значительные площади, сокращая растительный покров, вызывают просадочные явления в зоне влияния, через почвенно-грунтовые воды разрушают корневую систему естественной и культурной растительности. В 5-километровой зоне имеет место повышенная концентрация солей и химикатов, что может привести к засолению почв [7]. Ранее было отмечено, что риск засоления земель в этом районе добычи высок, и засоление имеет градиентное распределение, от терриконов в центре до дифференцированного распределения к периферии с большей степенью воздействия к западу [8]. Горячее выщелачивание, при котором калийные минералы растворяются при высоких температурах или с помощью химических растворителей, наносит более непосредственный и постоянный ущерб окружающей среде. Использование серной и соляной кислоты в условиях высокой температуры и давления, образующиеся кислые отходы в шламоохранилищах приводят к подкислению и засолению почвенного покрова. Высокотемпературная обработка также может активировать тяжелые металлы (например, мышьяк или кадмий) в руде, переводя их из стабильного в растворимое состояние и усугубляя риск химического загрязнения почвы [9]. Кроме того, горячее выщелачивание требует большого количества пресной воды для растворения руды, а чрезмерный забор воды может привести к понижению уровня грунтовых вод.

Солигорский горнопромышленный район расположен в Минской области Беларуси (52.79° с. ш., 27.54° в. д.), отличается умеренно-континентальным влажным климатом и достаточно неоднородными геоморфологическими условиями. Температура в этом горнодобывающем районе обычно колеблется между -7 °C и +25 °C. Средняя высота над уровнем моря составляет 150 м. Минимальное количество осадков выпадает в феврале, в среднем 12 мм, а максимальное – в июле, в среднем 70 мм. В связи с выраженной неоднородностью почвенного покрова территория исследования была разделена на девять блоков А–I с центром в Солигорском горнопромышленном районе, с длиной стороны каждого блока 30 км, для возможности сравнения изменений вегетационных индексов растительности по каждому блоку и анализа различий в структуре землепользования в горнопромышленном районе (рис. 1).

Для анализа ДДЗ были выбраны пять репрезентативных групп видов земель: лесные, пахотные, луговые, болота и водоемы. Ключевые участки по всем блокам исследования были сегментированы на квадраты с длиной стороны 100 м с помощью инструмента в комплексе ArcGIS, далее методом визуального дешифрирования было отобрано 150–200 соответствующих квадратов с равномерным распределением для каждого вида земель по территории исследования. Всего в геостатистическом анализе участвовало около 900 репрезентативных участков, что позволило эффективно повысить прогнозную точность моделей дешифрирования по каждому виду земель на основе вегетационных индексов отдельно и в сочетании.

В исследовании использовано 11 наборов космических снимков Sentinel-2A, сделанных в период с 19 марта по 30 сентября 2023 г. с пространственным разрешением 10 м [10]. Даты съемки сформированы исходя из анализа вегетационного индекса в сочетании с данными местного сайта климатических данных [4], что позволило определить начало и конец вегетационного периода: в Солигорске он обычно длится 5,6 месяца (170 дней) – примерно с 22 апреля по 9 октября [4].



Рис. 1. Территория в зоне влияния Солигорского горнопромышленного района

Fig. 1. Territory in the zone of influence of the Soligorsk mining district

Влияние горнодобывающей деятельности на растительный покров носит комплексный характер, и одним индексом анализа ДДЗ сложно оценить все варианты воздействия, поэтому использовано сочетание нескольких индексов: нормализованного индекса растительности NDVI, зеленого нормализованного индекса растительности GNDVI, почвенно-регулируемого индекса растительности SAVI и зеленого хлорофиллового индекса GCI. Из них NDVI является наиболее широко используемым индексом растительности, который может непосредственно реагировать на качество и количество биомассы, GNDVI более чувствителен к содержанию хлорофилла и водному стрессу растений, SAVI может уменьшить нарушение фона непокрытой почвы и подходит для малорастительных мест сброса или хвостохранилищ ($L = 0,5$), GCI очень чувствителен к концентрации хлорофилла в листьях и может напрямую реагировать на физиологический статус растений. Формулы и информация о четырех вегетационных индексах приведены в табл. 1.

Таблица 1. Индекс растительности и формула

Table 1. Vegetation index and formula

Индекс	Формула	Цитирование
GCI	$GCI = \frac{NIR}{Green} - 1$	Anatoly A. Gitelson [et al.], 2003 [11]
GNDVI	$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green}$	Li Fenling [et al.], 2015 [12]
NDVI	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	Wang Zhengxing [et al.], 2003 [13]
SAVI	$SAVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red + L} \cdot (1 + L)$	Guo Yuchuan [et al.], 2011 [14]

Примечание. Отражение в диапазоне: NIR – инфракрасном ближнем; Red – красном; Green – зеленом.

Результаты исследования и их обсуждение. Территория в пределах 3 км от Солигорска покрыта техногенными поверхностями (31 %), сельскохозяйственными землями (27 %), водой (16 %) и древесно-кустарниковой растительностью (15 %); территория в пределах 16 км покрыта сельскохо-

зяйственными землями (49 %) и древесно-кустарниковой растительностью (26 %), а территория в пределах 80 км – лесной растительностью (46 %) и видами сельскохозяйственных земель (37 %) [4]. На исследуемой территории есть несколько групп видов земель, таких как земли под застройкой, пахотные земли, лесные земли, земли под древесно-кустарниковой растительностью (ДКР), луговые земли, земли под болотами, земли под поверхностными водными объектами.

Чтобы изучить структуру землепользования на исследуемой территории, площадь пикселей нескольких видов земель на снимках дистанционного зондирования была рассчитана в соответствии с табл. 2, рис. 2 и с процентным соотношением площади пикселей в девяти исследуемых кварталах А–І.

Таблица 2. Процентное соотношение групп видов земель на исследуемой территории, %

Table 2. Percentage ratio of land types in the study area, %

Вид земель	Блок А	Блок В	Блок С	Блок D	Блок Е	Блок F	Блок G	Блок H	Блок І
Населенные пункты (1)	6,26	12,43	5,53	4,81	7,04	5,02	1,98	2,33	2,63
Земли под ДКР (2)	0,04	0,05	0,11	0,19	0,32	1,00	0,00	0,33	0,02
Лесные земли (3)	2,75	12,20	52,35	23,42	19,44	35,30	50,12	52,73	53,20
Луговые земли (4)	0,23	0,78	1,83	0,83	1,87	1,35	2,84	5,88	1,42
Водоемы и водотоки (5)	0,18	0,93	0,64	3,42	2,97	4,35	0,33	0,16	2,69
Поросль леса (6)	0,00	0,12	3,65	1,79	0,50	1,71	3,24	4,06	6,89
Пахотные земли (7)	89,29	72,12	35,80	64,62	67,18	51,00	41,39	34,47	33,06
Земли под постоянными культурами (8)	1,24	1,36	0,08	0,91	0,68	0,26	0,09	0,02	0,10

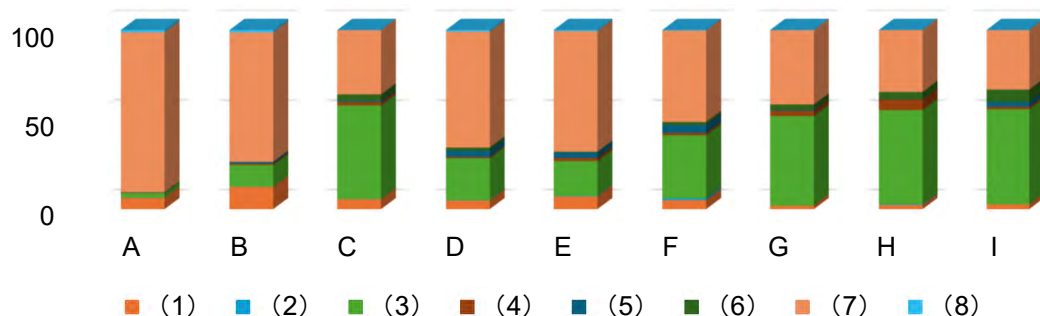


Рис. 2. Процентное соотношение групп видов земель на исследуемой территории

Fig. 2. Percentage of land types in the study area

Анализ структуры землепользования показывает, что в районе исследования блок А (82,29 % площади составляют пахотные земли и 1,24 % – земли под постоянными культурами) наиболее освоен сельским хозяйством. В блоках В, D и Е виды земель имеют схожую структуру: подавляющее большинство площади занимают пахотные земли, а 12,2–23,42 % – лесные. В блоках С, G, H и І доля лесных земель составляет более 50 %, а доля пахотных земель снижается (30–40 %). В блоке F около 50 % занимают пахотные земли, а 38 % – естественная растительность. В целом в районе исследования пахотные земли возделываются в основном в северо-западном направлении от горнопромышленного района, а естественная растительность более выражена в юго-восточном направлении (около 50 % площади). Пахотные земли и лесные земли составляют большую часть выбранного района исследования – от 84,32 до 92,04 % суммарно. Поэтому для выявления деградации растительного (естественного и культурного) покрова в данном районе исследования необходимо использовать соответствующие индексы. В ходе интерпретации дешифровочных изображений на основании известного соотношения каждой группы видов земель на исследуемой территории (табл. 2) по каждому блоку внесены поправки. В табл. 3 приведены средние значения четырех индексов растительности (по всем точкам пикселей) для снимков дистанционного зондирования от 30 сентября 2023 г. в девяти исследуемых блоках. В соответствии с методом средневзвешенного значения (1) таким образом была учтена разная структура

землепользования по каждому из девяти блоков (табл. 4). По данным табл. 4 были построены кривые регрессии и вычислены коэффициенты детерминации (R^2) для четырех растительных индексов (рис. 3), показывающие тенденции изменения растительных индексов во времени и точность моделей для каждого из девяти блоков исследования.

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i, \quad (1)$$

где S – синтез результатов; n – общее количество влияющих факторов; w_i – вес i -го фактора; x_i – значение i -го фактора.

Таблица 3. Индексы растительности для девяти исследуемых блоков по состоянию на 30.09.2023

Table 3. Vegetation index for the nine study blocks as of 30 September 2023

Блок	NDVI	GNDVI	SAVI	GCI
A	0,404984	0,380708	0,336374	1,48662
B	0,391220	0,375277	0,309952	1,41617
C	0,381983	0,371962	0,279228	1,31387
D	0,381879	0,363366	0,295498	1,29053
E	0,361994	0,352845	0,285861	1,18231
F	0,372661	0,367993	0,277627	1,19142
G	0,410049	0,388685	0,307149	1,33168
H	0,403679	0,386569	0,295312	1,26876
I	0,393584	0,391929	0,286857	1,09991

Таблица 4. Пересчитанное среднее значение индексов растительности по состоянию на 30.09.2023

Table 4. Recalculated mean value of vegetation indices as of 30 September 2023

Блок	NDVI	GNDVI	SAVI	GCI
A	0,404943	0,380669	0,336340	1,486471
B	0,391180	0,375239	0,309921	1,416028
C	0,381944	0,371924	0,279200	1,313738
D	0,381840	0,363329	0,295460	1,290400
E	0,361994	0,352845	0,285861	1,182310
F	0,372623	0,367956	0,277599	1,191300
G	0,410007	0,388646	0,307118	1,331546
H	0,403598	0,386491	0,295252	1,268506
I	0,393623	0,391968	0,286885	1,100019

Репрезентативные 900 участков для всех групп видов земель, как показано на рис. 4 (по 100 в каждом блоке исследований) способствовали увеличению пространственной точности. Выполненный анализ по 11 космическим снимкам спутника Sentinel-2A с марта по сентябрь 2023 г. показал, что пространственная точность четырех вегетационных индексов на всей территории исследования находится в ряду NDVI ($R^2 = 0,8745$) > SAVI ($R^2 = 0,869$) > GNDVI ($R^2 = 0,8483$) > GCI ($R^2 = 0,8319$).

Кривые регрессии и R^2 индексов NDVI на 900 исследуемых участках для четырех групп видов земель приведены на рис. 5. Обнаружено схожее вегетационное развитие растительности в лесах, на пахотных и луговых землях, а также на болотах, подтверждаемое значениями NDVI для каждой группы видов земель. Для трех видов земель R^2 NDVI имеют удовлетворительное значение – 0,78, 0,82 и 0,78 соответственно, с хорошей пространственной точностью [15]. На землях под болотами R^2 невысок и составляет 0,53 с плохой пространственной точностью, напрямую зависящей от изменения уровня воды в соотношении растительного покрова и обнаженности почвы. Аналогичным образом выполнен расчет индексов GNDVI, SAVI и GCI, результаты имеют схожие с NDVI характеристики.

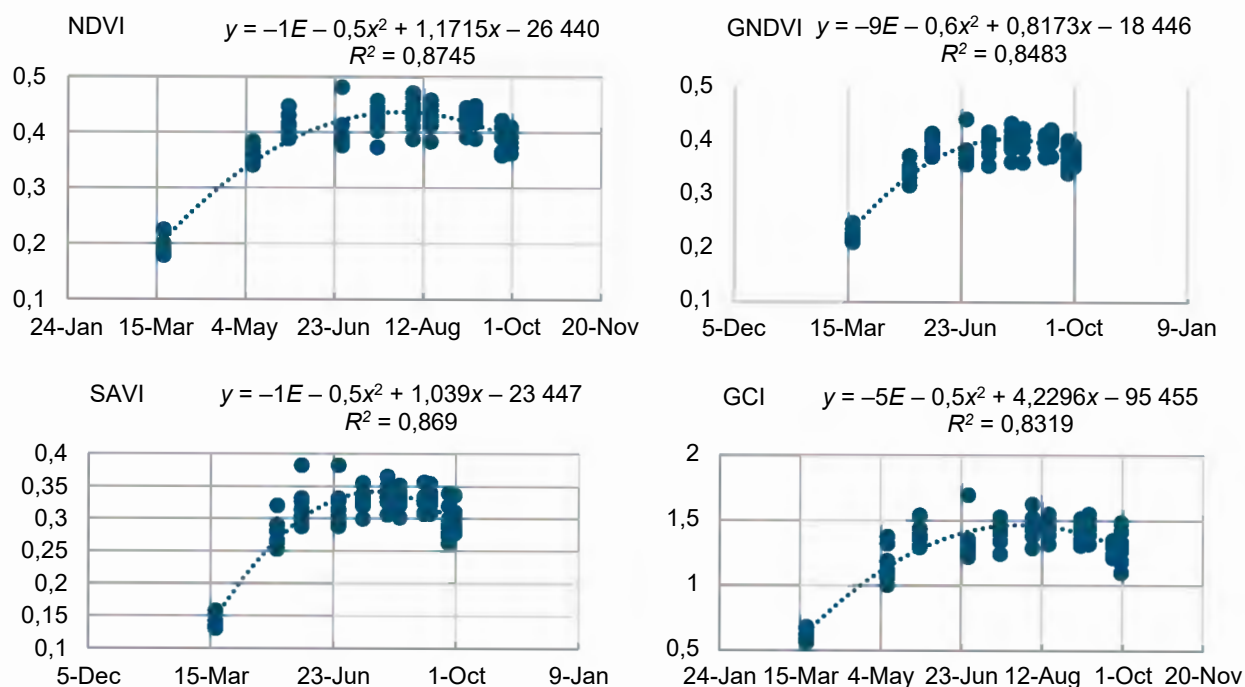


Рис. 3. Кривые регрессии и коэффициенты детерминации (R^2) для четырех индексов растительности, взвешенных по структуре землепользования

Fig. 3. Regression curves and coefficients of determination (R^2) for the four vegetation indices weighted by landholding structure

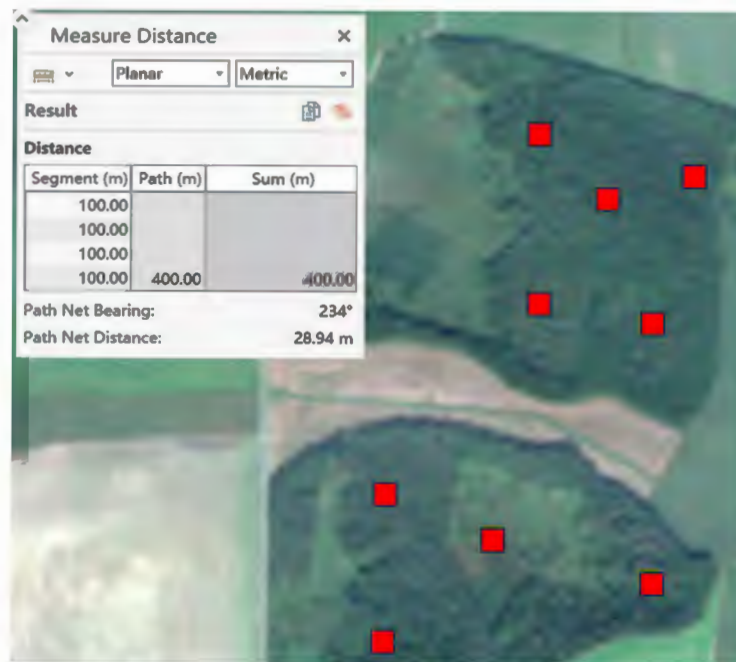


Рис. 4. Репрезентативные участки 100 м × 100 м для лесных земель

Fig. 4. Representative plots 100 m × 100 m for forest land type

Результаты анализа на рис. 5 и в табл. 5 подтверждают соотношение вегетационных индексов по уровню корреляции в ряду $NDVI > GNDVI > SAVI > GCI$ и более удовлетворительных значений для определения в структуре землепользования лесов, пахотных и луговых земель.

Динамика значений вегетационных индексов играет важную роль при определении моделей дешифрирования разных групп видов земель, поскольку указывает на вероятные отклонения в течение вегетационного периода. На рис. 6 показаны изменения четырех вегетационных индексов выбранных репрезентативных участков лесных земель по всем блокам в Солигорском горнопромышленном районе. Дата дистанционного зондирования предусматривает 11 вариантов в течение вегетации: 19 марта, 8 и 28 мая, 27 июня, 17 июля, 6 и 16 августа, а также 5, 10, 25 и 30 сентября.

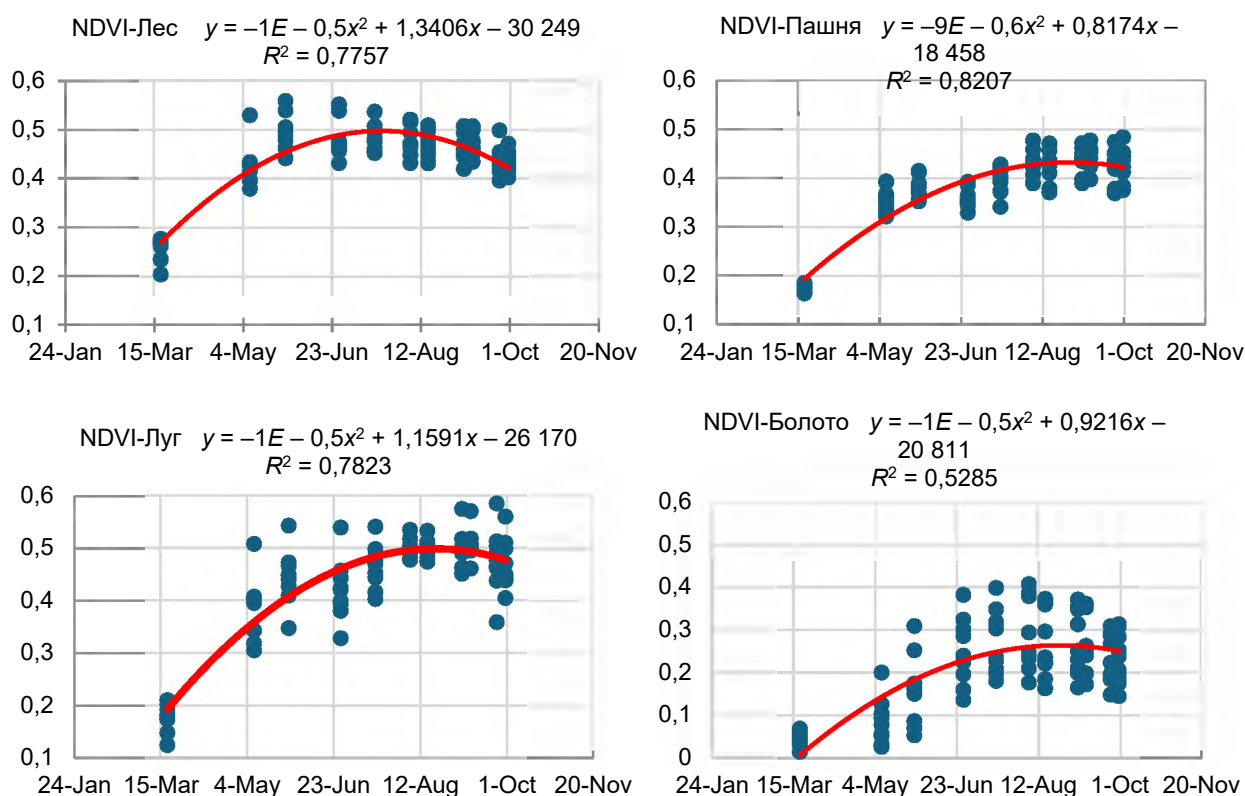


Рис. 5. Кривые регрессии NDVI для четырех видов земель: леса, пашни, луга и болота

Fig. 5. NDVI regression curves for four land types: forests, croplands, grasslands and wetlands

Таблица 5. Коэффициент детерминации R^2 вегетационного индекса для видов земель по всем девяти блокам исследования

Table 5. Determination coefficient R^2 of vegetation index for land types for all nine study blocks

R^2	Лес	Пашня	Луг	Болото
NDVI	0,7755	0,8207	0,7823	0,5285
GNDVI	0,7548	0,7966	0,7538	0,4564
SAVI	0,7353	0,7915	0,7274	0,4553
GCI	0,6930	0,7650	0,6913	0,4021

Как показано на рис. 6, динамика четырех вегетационных индексов относительно схожа, независимо от единиц измерения (GCI отличается от численных значений трех других индексов). Значительные максимумы четырех вегетационных индексов наблюдались в регионах A и G (NDVI = 0,55, GCI = 2,09). Более низкие значения обнаружены в блоках C, F и I (NDVI = 0,40, GCI = 1,24). Причина этого в большей продуктивности почв в западной части (блоки A, D, G), и следовательно, в более высоком содержании органического вещества [16]. Уровень засоления почв, более высокий уровень грунтовых вод или дополнительные лесоустроительные мероприятия как вероятные причины такого явления будут изучены в дальнейших исследованиях. В подтверждение наличия дополнительных факторов выступает меньшее количество санитарных и обслуживающих рубок ухода в разных блоках исследования.

Линии на графиках (рис. 6–8) в соответствии с датами съемки (период с марта по сентябрь) отражают постепенное увеличение вегетации с марта по май, ее стабилизацию и небольшое снижение ближе к сентябрю, что соответствует климатической норме в Солигорском районе.

Вегетационный индекс обрабатываемых пахотных земель во всех блоках (см. рис. 7) был одинаковым в ранневесенний период в марте, находясь в самой низкой точке ($NDVI = 0,17$, $GCI = 0,55$), и достигал среднего значения в мае ($NDVI = 0,36$, $GCI = 1,20$). Максимум в мае наблюдался в блоках А и Е ($NDVI = 0,41$, $GCI = 1,53$), максимум в июне – в блоках А и G ($NDVI = 0,39$, $GCI = 1,26$), минимум – в блоке F ($NDVI = 0,33$, $GCI = 1,01$). С середины июля до середины августа низкий экстремум был характерен для блока Е ($NDVI = 0,34$, $GCI = 1,13$), средние значения индексов – в блоке F ($NDVI = 0,45$, $GCI = 1,5$), а минимум в этот период наблюдался на территории блока G ($NDVI = 0,37$, $GCI = 1,17$). В сентябре вегетационные индексы были низкими в блоках D и F ($NDVI = 0,37$, $GCI = 1,27$) и высокими в блоке Е ($NDVI = 0,48$, $GCI = 1,7$). Все четыре вегетационных индекса имеют тенденцию к повышению в западной части района добычи и к постепенному снижению в восточной части исследуемого района.

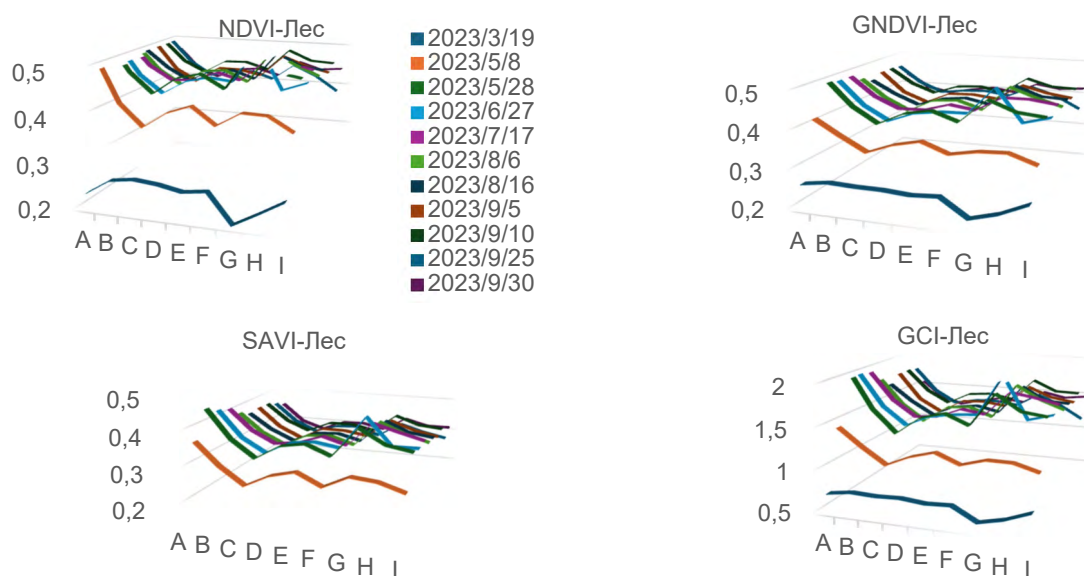


Рис. 6. Динамика индексов для лесной растительности по девяти исследуемым блокам за вегетационный период

Fig. 6. Dynamics of indices for forest vegetation in nine study blocks during the vegetation period

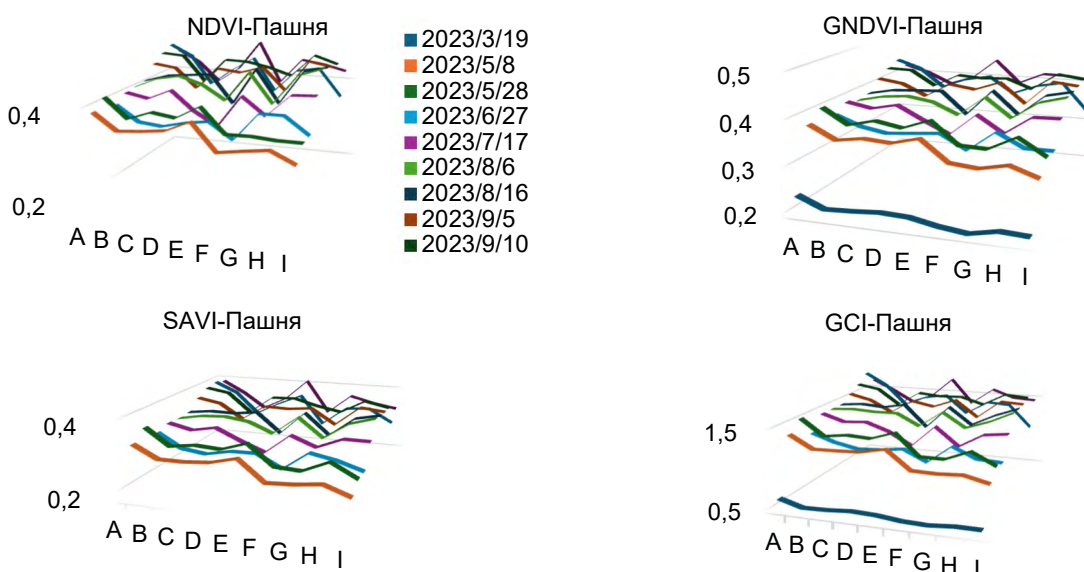


Рис. 7. Изменение индексов для пахотных земель по девяти исследуемым блокам

Fig. 7. Change in indices for cropland across the nine study blocks

Вегетационный индекс пахотных земель сильно зависит от антропогенных факторов и цикла роста культур. Весной и осенью он обычно выше в западной части исследуемой территории и постепенно снижается к востоку. Вегетационный индекс элементов пахотных земель сложнее, чем лесных, так как колебания его значений могут быть обусловлены особенностями обработки и посевов в зависимости от возделываемой культуры [17].

На рис. 8 показаны изменения вегетационных индексов по точкам отбора для луговых (пастбищных и сенокосных) земель в различных исследуемых блоках в том же хронологическом порядке. В границах луговых земель наблюдается постепенное увеличение, а затем уменьшение индексов с течением вегетационного периода. Вегетационный индекс лугов был высоким в блоке Н ($NDVI = 0,54$, $GCI = 1,90$), а в летние месяцы – в блоках А, С, Е и Н ($NDVI = 0,58$, $GCI = 2,12$). В целом можно сказать, что значения вегетационных индексов выше в западном регионе и постепенно снижаются к востоку. Причина этого может быть аналогична лесной растительности, луга в западной части исследуемого района имеют лучшие условия для развития луговых ассоциаций [18]. На рис. 8 блоки А и Н имеют очевидные высокие точки ($NDVI = 0,58$, $GCI = 2,12$), что объясняется наличием здесь лучше выраженной речной сети и приуроченности естественных лугов к пойменной ее части, что пропорционально увеличивает вегетационные индексы.

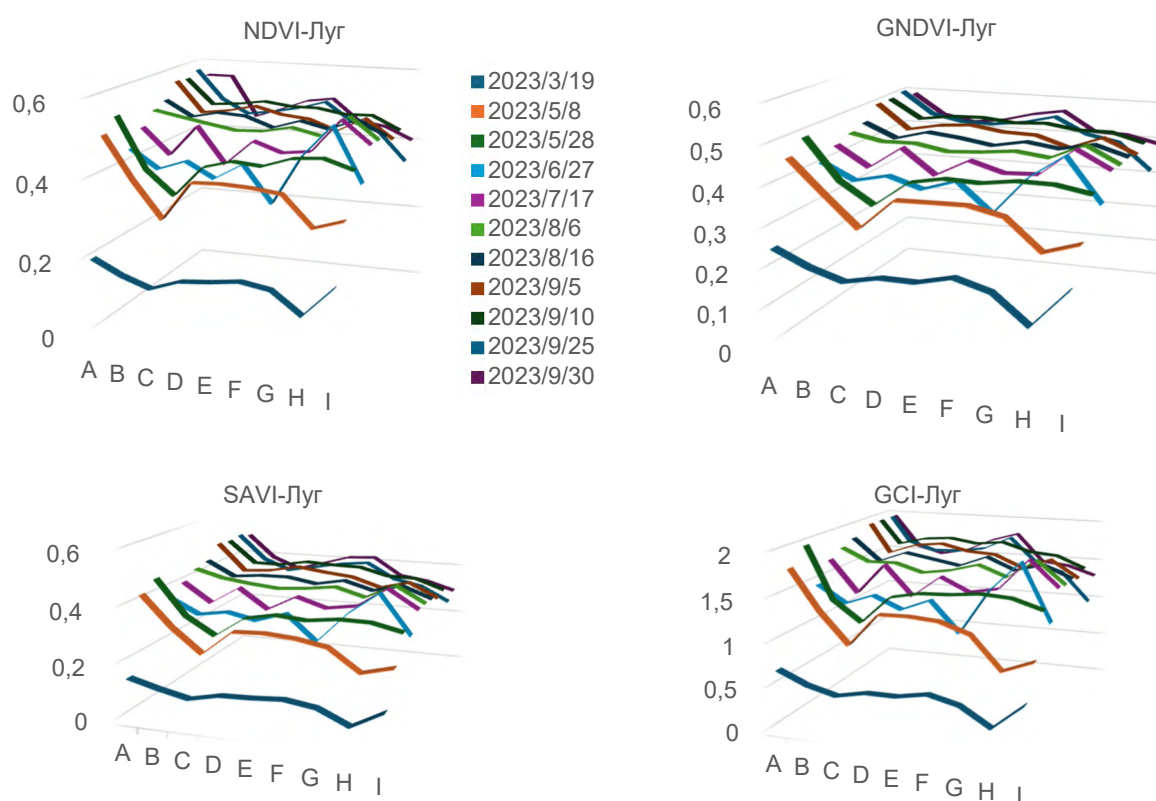


Рис. 8. Изменение индексов для луговых земель по девяти исследуемым блокам

Fig. 8. Change in indices for grassland across the nine study blocks

На рис. 9 показана вариация вегетационных индексов для выбранных репрезентативных участков болотных земель в том же хронологическом порядке. На рис. 9 блоки Е, F и I имеют высокие показатели ($NDVI = 0,41$, $GCI = 1,15$), что вызвано большим количеством здесь болот и заболоченных пойм и распространением болотной растительности. Степень заболоченности в блоках С и G выше, а площадь переувлажненных участков больше площади растительности. Это обуславливает низкие значения вегетационного индекса ($NDVI = 0,13$, $GCI = 0,25$). Сочетание болот и водоемов снижает эффективность вегетационного индекса [19, 20].

Анализ динамики различных вегетационных индексов в разных частях Солигорского горнопромышленного района показывает выраженную связь с почвенными условиями, предопределенными в большой степени генезисом почвообразующих пород и особенностями рельефа местности. В соответствии с приведенной картой геоморфологических условий на рис. 10 наблюдается достаточная

контрастность аккумулятивных и эрозионно-аккумулятивных поверхностей, в том числе связанных с границей сожского оледенения. Распространены пять форм рельефа, формирующие гидрогеологические и почвенные условия, определяющие вероятность проявления процессов деградации земель, вызванных влиянием Солигорского калийного комбината. Это грядово-холмистые и холмисто-краевые ледниковые формы рельефа, холмистые моренные равнины, волнистые и полуволнистые ледниковые равнины и низменности, плоские озера и аллювиальные низменности, флювиальные ледниковые равнины и низменности. В последующих исследованиях планируется провести соизмерение их границ с вегетационными индексами, дифференцирующими виды земель по количественной оценке состояния естественной и культурной растительности.

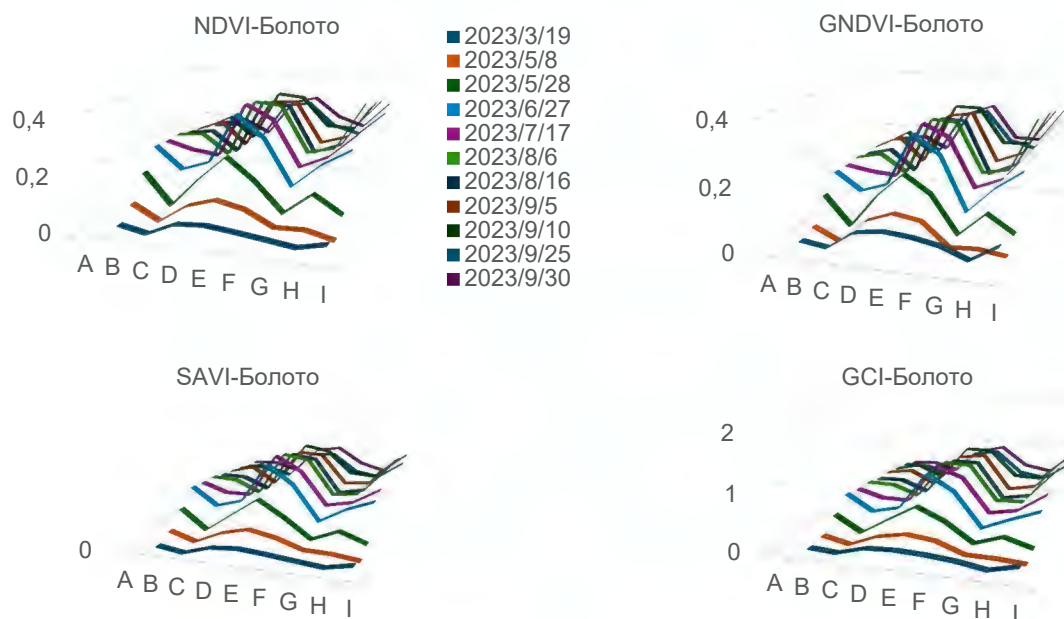


Рис. 9. Изменения индексов на землях под болотами по девяти исследуемым блокам

Fig. 9. Changes in indices on land under wetlands across the nine study blocks

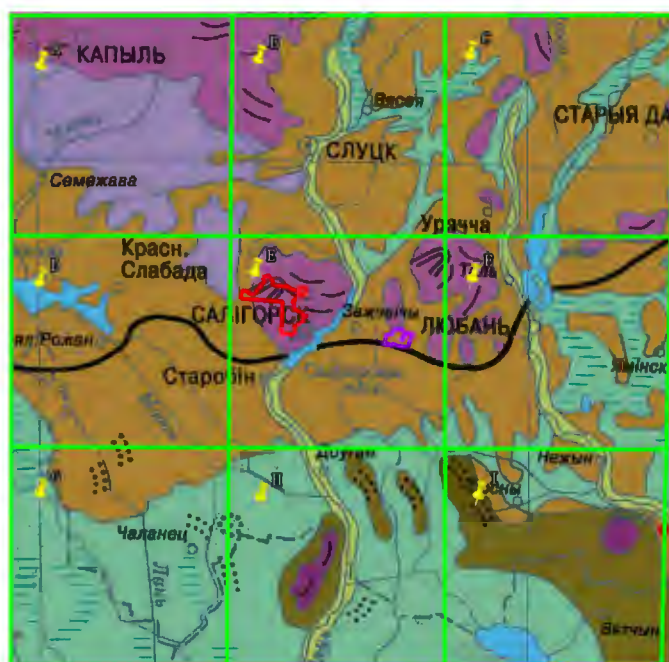


Рис. 10. Геоморфологические условия территории исследования [21]

Fig. 10. Geomorphologic conditions of the study area [21]

Заключение. В результате проведенных исследований на территории Солигорского горнопромышленного района определена структура землепользования по ДДЗ. Модель дешифрирования пяти групп видов земель по девяти территориальным блокам была уточнена (автокоррелирована) на основе их долевого участия, что позволило получить удовлетворительные результаты ($R^2 = 0,72-0,82$) по четырём из пяти видов землепользования. Анализ динамики индексов NDVI, GNDVI, SAVI и GCI позволил дифференцировать виды земель в зоне влияния Солигорского калийного комбината и произвести оценку состояния растительности в течение вегетационного периода.

Полученная структура землепользования открывает пути для дальнейшего пофакторного установления зависимости состояния почвенного и растительного покрова от природных (почвенных, гидрогеологических, геоморфологических и др.) и антропогенных факторов. Используемые методы машинного обучения и полученный оценочный ряд вероятностного дешифрирования по индексам $NDVI > GNDVI > SAVI > GCI$ позволят в дальнейшем пространственно выявить подобные закономерности.

Список использованных источников

1. 黄土高原露天煤矿复垦土壤-植被系统恢复力及协同—权衡关系 / 陈浮, 朱燕峰, 骆占斌, 等 // 煤炭学报. – 2024. – Vol. 49, № 11. – P. 4950–4602. = Устойчивость почвенно-растительной системы и синергетические эффекты при рекультивации открытых угольных шахт на лёссовом плато / Чэнь Фу, Чжу Яньфэн, Ло Чжаньбинь [и др.] // Журнал по изучению каменного угля. – 2024. – Vol. 49, № 11. – P. 4950–4602. – DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0326.
2. Study on the influence of mining disturbance on the variation characteristics of vegetation index: A case study of Lingwu Mining Area / Guo Yachao, Huang Yanli, Li Junmeng [et. al.] // Environmental Development. – 2023. – Vol. 45. – DOI: 10.1016/j.envdev.2023.100811.
3. 中国矿区土地退化因素调查: 概念、类型与方法 / 李海东, 沈渭涛, 司万童, 等 // 生态与农村环境学报. – 2015. – Vol. 31, № 4. – P. 445–451. = Исследование факторов деградации земель в горнодобывающих районах Китая: концепции, виды и методы / Ли Хайдун, Шэнь Вэйтао, Си Вантун, Ян Циньву // Экология и сельская среда. – 2015. – Vol. 31, № 4. – P. 445–451. – DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2015.04.001.
4. Климат и средняя погода круглый год в Солигорск : [сайт]. – Миннеаполис, 2024. – URL: <https://ru.weatherspark.com/y/95110/%D0%9E%D0%B1%D1%8B%D1%87%D0%BD%D0%B0%D1%8F-%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0-%D0%B2-%D0%A1%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%B3%D0%BE%D1%80%D1%81%D0%BA-%D0%91%D0%B5%D0%BB%D0%B0%D1%80%D1%83%D1%81%D1%8C-%D0%B2%D0%B5%D1%81%D1%8C-%D0%B3%D0%BE%D0%B4> (дата обращения: 01.03.2025).
5. Официальный сайт Республики Беларусь : [сайт]. – Минск, 2009–2025. – URL: <https://www.belarus.by/ru/business/brands-of-belarus> (дата обращения: 01.03.2025).
6. 白俄罗斯钾盐资源禀赋与投资环境分析 / 张宇轩, 李旭拓, 刘明义, 等 // 西北地址. – 2022. – Vol. 55, № 3. – P. 306–317. = Анализ обеспеченности калийными ресурсами и инвестиционной среды в Беларуси / Чжан Юйсюань, Ли Сютоу, Лю Минъи [и др.] // Северо-западная геология. – 2022. – Vol. 55, № 3. – P. 306–317.
7. 我国盐湖浮选提钾技术及机理 / 惠庆华, 权朝明, 张慧芳, 等 // 应用化工. – 2021. – Vol. 50, № 12. – P. 3414–3419. = Технология и механизм извлечения калия флотацией в соленом озере Китая / Хуэй Цинхуа, Цюань Чжаоми, Чжан Хуэйфань [и др.] // Прикладная химия. – 2021. – Vol. 50, № 12. – P. 3414–3419. – DOI: doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.2021.12.007.
8. Zhao Bochao. Spatial distribution of soils by salinization level in soligorsk district of Belarus / Zhao Bochao, Chervan Alexander // Почвенно-земельные ресурсы. – 2024. – Vol. 1. – P. 5–12.
9. 钾长石提钾技术进展 / 张晓慢, 雍倩禧, 祁梦瑶, 等 // 矿产保护与利用. – 2020. – Vol. 4. – P. 172–178. = Status and Prospect of Potassium Extracting from Potassium Feldspar / Чжан Сяома, Юн Цяньси, Ци Мэнъяо [и др.] // Сохранение и использование минеральных ресурсов. – 2020. – Vol. 4. – P. 172–178.
10. Взгляды Европы на Землю : [сайт]. – Брюссель, 2014–2025. – URL: <https://www.copernicus.eu/en> (дата обращения: 01.03.2025).
11. Gitelson, Anatoly A. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves / Anatoly A. Gitelson, Yuri Gritz, Mark N. Merzlyak // Journal of Plant Physiology. – 2003. – Vol. 160, № 3. – P. 271–282. – DOI: doi.org/10.1078/0176-1617-00887.
12. 基于高分一号卫星数据的冬小麦叶片SPAD值遥感估 / 李粉, 王力, 刘京, 等 // 农业机械学报. – 2015. – Vol. 46, № 9. – P. 273–281. = Оценка величины SPAD для листьев пшеницы с помощью дистанционного зондирования на основе данных GF-1 / Ли Фенлинг, Ван Ли, Лю Цзин, Чанг Цинжуй // Труды Китайского общества сельскохозяйственной техники. – 2015. – Vol. 46, № 9. – P. 273–281. – DOI: doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.040.
13. 王正兴. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI / 王正兴, 刘闯. // 生态学报. – 2003. – Vol. 23, № 5. – P. 979–987. = Ван Чжэнсин. Прогресс в исследовании индекса растительности: от AVHRR-NDVI до MODIS-EVI / Ван Чжэнсин, Лю Чжуань // Китайский экологический акт. – 2003. – Vol. 23, № 5. – P. 979–987.

14. 郭玉川. 基于MODIS的干旱区植被覆盖度反演及植被指数优选 / 郭玉川, 何英, 李霞 // 国土资源遥感. – 2011. – Vol. 2. – P. 115–118. = Го Юйчуань. Инверсия растительного покрова и оптимизация вегетационного индекса в засушливых районах на основе MODIS / Го Юйчуань, Хэ Ин, Ли Ся // Дистанционное зондирование земли и ресурсов. – 2011. – Vol. 2. – P. 115–118.
15. Akhona Madasa. Application of geospatial indices for mapping land cover/use change detection in a mining area / Akhona Madasa, Israel R. Orimoloye, Olusola O. Ololade // Journal of African Earth Sciences. – 2021. – Vol. 175. – P. 104–108. – DOI: doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104108.
16. Bascietto Marco. Spatial Variations of Vegetation Index from Remote Sensing Linked to Soil Colloidal Status / Bascietto Marco, Enrico Santangelo, Claudio Beni // Land. – 2021. – Vol. 10, № 1. – P. 80. – DOI: https://doi.org/10.3390/land10010080.
17. Orimoloye, I. R. Spatial evaluation of land-use dynamics in gold mining area using remote sensing and GIS technology / I. R. Orimoloye, O. O. Ololade // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2020. – Vol. 17, № 11. – P. 4465–4480. – DOI: 10.1007/s13762-020-02789-8.
18. 基于 Landsat 8 和随机森林的青海门源天然草地上生物量遥感估 / 赵翊含, 侯蒙京, 冯琦, 等. // 草业学报. – 2022. – Vol. 31, № 7. – P. 1–14. = Оценка с помощью дистанционного зондирования надземной биомассы естественных пастбищ в Мэньюане, Цинхай, на основе данных Landsat 8 и случайных лесов / Чжао Ихань, Хоу Мэнцзин, Фэн Цишэн [и др.] // Журнал пастбищной науки. – 2022. – Vol. 31, № 7. – P. 1–14.
19. 植物物种多样性无人机高光谱遥感反演研究 / 唐希颖, 李化哲, 崔丽娟, 等 // 地球信息科学. – 2024. – Vol. 26, № 8. – P. 1954–1974. = Инверсия видового разнообразия водно-болотных растений с использованием гиперспектральных данных БПЛА / Тан Сиин, Ли Хуачжэ, Цуй Лицзюань [и др.] // Журнал геоинформационных наук. – 2024. – Vol. 26, № 8. – P. 1954–1974. – DOI: 10.12082/dqxkx.2024.240055.
20. 廖程浩. MODIS数据水体识别指数的识别效果比较分析 / 廖程浩, 刘雪华 // 国土资源遥感. – 2008. – Vol. 4. – P. 22–27. = Ляо Чэньхао. Сравнительный анализ эффективности индексов идентификации водных объектов по данным MODIS / Ляо Чэньхао, Liu Xuehua // Дистанционное зондирование земельных ресурсов. – 2008. – Vol. 4. – P. 22–27.
21. Геоморфологическая карта // Национальный атлас Беларуси. – Минск : Белкартография, 2002. – С. 67.

References

1. Chen Fu, Zhu Yanfeng, Luo Zhanbin, et al. Soil-Vegetation System Resilience and Synergies – Trade-Offs in Reclaiming Surface Coal Mines on The Loess Plateau. *Journal of Chian Coal Science*, 2024, vol. 49, pp. 4950–4602. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0326. (in Chinese)
2. Yachao Guo, Yanli Huang, Junmeng Li, Shenyang Ouyang, Laiwei Wu, Wenyue Qi. Study on the influence of mining disturbance on the variation characteristics of vegetation index: A case study of Lingwu Mining Area. *Environmental Development*, 2023, vol. 45. DOI: 10.1016/j.envdev.2023.100811.
3. Li Haidong, Shen Weishou, Si Wantong, Yan Qingwu. Investigation of Driving Factors of Land Degradation in Mine Areas in China: Concept, Types and Approaches. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, vol. 3, pp. 445–451. DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2015.04.001. (in Chinese)
4. *Klimat i srednyaya pogoda kruglyj god v Soligorske* [Climate and average weather all year round in Soligorsk]. 2025. Available at: <https://ru.weatherspark.com/y/95110/%D0%9E%D0%B1%D1%8B%D1%87%D0%BD%D0%B0%D1%8F%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D0%B2%D0%A1%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%B3%D0%BE%D1%80%D1%81%D0%BA%D0%91%D0%B5%D0%BB%D0%B0%D1%80%D1%83%D1%81%D1%8C%D0%B2%D0%B5%D1%81%D1%8C-%D0%B3%D0%BE%D0%B4> (accessed 1 December 2025). (in Russian)
5. *Oficial'nyj sajt Respubliki Belarus'* [Official Website of the Republic of Belarus]. 2025. Available at: <https://www.belarus.by/cn/business/brands-of-belarus> (accessed 1 December 2025). (in Russian)
6. Zhang Yuxuan, Li Xutuo, Liu Mingyi, Gao Yongwei, Zhang Dandan. Analysis of Potash Resource Endowment and Investment Environment in Belarus. *Northwestern Geology*, vol. 5, pp. 306–317. DOI: 10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.03.025. (in Chinese)
7. Hui Qinghua, Quan Zhaoming, Zhang Huifang, et al. Potassium extraction technology and mechanism by flotation in China's salt lake. *Applied Chemical Industry*, 2021, vol. 50, pp. 3414–3419. DOI: doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.2021.12.007. (in Chinese)
8. Zhao Bochao, Chervan A. N. Spatial distribution of soils by salinization level in Soligorsk district of Belarus. *Soil and Land Resources*, 2024, vol. 1, pp. 5–12.
9. Zhang Xiaoman, Yong Qianxi, Qi Mengyao, Sun Zhifu, Cao Peiyi, Peng Weijun. Status and Prospect of Potassium Extracting from Potassium Feldspar. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020, vol. 40, no. 4, pp. 172–178. DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.04.021. (in Chinese)
10. Vzglady Evropy na Zemlyu [Copernicus Eurpes eyes on Earth]. 2025. Available at: <https://www.copernicus.eu/en> (accessed 1 December 2025). (in Russian)
11. Anatoly A. Gitelson, Yuri Gritz, Mark N. Merzlyak. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*, 2003, vol. 16, pp. 271–282. DOI: doi.org/10.1078/0176-1617-0088.
12. Li Fenling, Wang Li, Liu Jing, Chang Qingrui. Remote Sensing Estimation of SPAD Value for Wheat Leaf Based on GF-1 Data. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, vol. 4, pp. 273–281. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.040. (in Chinese)

13. Wang Zhengxing, Liu Chuang, Huete Alfredo. Progress in Vegetation Index Research: From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, vol. 2, pp. 979–987. (in Chinese)
14. Guo Yuchuan, He Ying, Li Xia. Vegetation coverage inversion and vegetation index optimization in arid areas based on MODIS. *Remote Sensing of Land and Resources*, 2011, vol. 2, pp. 115–118. (in Chinese)
15. Akhona Madasa, Israel R. Orimoloye, Olusola O. Ololade. Application of geospatial indices for mapping land cover/use change detection in a mining area. *J. of African Earth Sciences*, 2021, vol. 175, pp. 104–108. DOI: doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104108.
16. Bascietto Marco, Enrico Santangelo, Claudio Beni. Spatial Variations of Vegetation Index from Remote Sensing Linked to Soil Colloidal Status. *Land*, 2021, vol. 1, pp. 80. DOI: doi.org/10.3390/land10010080.
17. Orimoloye R., Ololade O. O. Spatial evaluation of land-use dynamics in gold mining area using remote sensing and GIS technology. *International J. of Environmental Science and Technology*, 2020, vol. 1, pp. 4465–4480. DOI: 10.1007/s13762-020-02789-8.
18. Zhao Yihan, Hou Mengjing, Feng Qisheng, e. a. Remote sensing estimation of aboveground biomass of natural grassland in Menyuan, Qinghai based on Landsat 8 and random forests. *J. of Grassland Science*, 2022, vol. 3, pp. 1–14. (in Chinese)
19. Tang Xiyang, Li Huazhe, Cui Lijuan, Zhao Xinsheng, Zhai Xiajie, Lei Yinru, Li Jing, Wang Jinzhi, Li Wei. Inversion of Wetland Plant Species Diversity Using UAV Hyperspectral Data. *J. of Earth Information Science*, 2024, vol. 2, pp. 1954–1974. DOI: 10.12082/dqxkx.2024.240055. (in Chinese)
20. Liao Chenghao, Liu Xuehua. Comparative analysis of the identification effectiveness of water body identification indices from MODIS data. *Remote sensing of land resources*, 2008, vol. 4, pp. 22–27. (in Chinese)
21. *Geomorfologicheskaya karta* [Geomorphological map]. *Natsional'nyi atlas Belarusi = National Atlas of Belarus*. Minsk, Belkatografiya Publ., 2002, pp. 67. (in Russian)

Информация об авторах

Цзян Чэнь – аспирант факультета географии и геоинформатики БГУ (ул. Ленинградская, 16, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: sweenei1j@gmail.com

Червань Александр Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики БГУ (ул. Ленинградская, 16, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: ChervanAlex@mail.ru

Information about the authors

Jiang Chen – Post Graduate Student, Belarusian State University (16, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: sweenei1j@gmail.com

Chervan Alexander Nikolaevich – Ph. D. (Agriculture), Associate Professor, Head of Department of Soil Science and Geoinformatic, Faculty of Geography and Geoinformatic, Belarusian State University (16, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: ChervanAlex@mail.ru