

Оценка влияния температуры поверхности земли на NDVI на примере геопарка «Янган-Тау»

Е. А. Богдан^{1,2}✉, Л. Н. Белан^{1,2}, И. О. Туктарова¹, И. Р. Вильданов^{1,2},
И. Ю. Сайфуллин^{1,2}, Р. С. Бахтиярова¹

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, Российская Федерация
(450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1)

²Уфимский университет науки и технологий, Российская Федерация
(450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32)

Аннотация. Цель – определение наиболее зависимых от изменения температурного режима типов растительности на участке «Геопарк Янган-Тау» (площадка «Насибаш») Евразийского карбонового полигона (Республика Башкортостан).

Материалы и методы. Проведен анализ динамики показателя NDVI с мая по сентябрь с 1982 по 2022 годы с использованием 110 изображений Landsat, с объединением в группы по 5 лет. Определены среднее значение, мода и медиана показателя NDVI для каждой пятилетки. Для дистанционной оценки температурного режима использовались снимки программы Landsat 8-9. В программе SAGA GIS оценена связь температуры поверхности Земли и NDVI для каждого бесснежного месяца с использованием усредненных изображений температуры поверхности Земли и NDVI. Построены карты пространственного распределения коэффициента детерминации (r^2).

Результаты и обсуждение. Для июня месяца характерно увеличение значения NDVI. Май, июль и август месяц не демонстрируют значительных изменений, а среднее значение и медиана для сентября имеет тенденцию к снижению. Наибольшую связь между NDVI и температурой поверхности Земли показывают зарастающие сосной залежные земли (4 стадия зарастания), не заросшие залежные земли и сенокос.

Выводы. Вегетационная активность растительности на участке карбонового полигона «Геопарк Янган-Тау» увеличилась с 1982 для июня месяца, что обусловлено влиянием температуры мая. Наибольшую устойчивость к изменениям температурного режима продемонстрировали участки, находящиеся в 1 и 3 стадии зарастания сосной.

Ключевые слова: изменение климата, карбоновый полигон, NDVI, температура поверхности Земли, глобальный геопарк ЮНЕСКО «Янган-Тау».

Источник финансирования: Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на тему «Оценка объема эмиссии и поглощения парниковых газов репрезентативными типами экосистем на участках Евразийского карбонового полигона и поиск оптимальных технологических решений для декарбонизации Республики Башкортостан» (номер для публикаций: FEUR-2024-0007).

Для цитирования: Богдан Е. А., Белан Л. Н., Туктарова И. О., Вильданов И. Р., Сайфуллин И. Ю., Бахтиярова Р. С. Оценка влияния температуры поверхности земли на NDVI на примере геопарка «Янган-Тау» // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2024, № 3, с. 14-21. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/3/14-21>

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции изменения климата вызывают большую обеспокоенность у мирового сообщества, требует постоянного мониторинга и разработки стратегии адаптации. Важным аспектом, охватывающим такие сферы экономики как сельское и лесное хозяйство, является изучение и мониторинг реакции растительности на изменение температурно-влажностного режима.

С развитием дистанционного зондирования Земли и использованием многозональных космических снимков в исследовании изменений экосистем стали активно применяться вегетационные индексы, из которых наиболее распространенный и эффективный – нормализованный относительный индекс растительности Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) [7, 16].

Расчет данного индекса базируется на двух участках кривой спектральной отражательной способности растений. В красной области спектра (RED) (0,6-0,7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а в ближнем участке инфракрасной области (NIR) (0,7-1,3 мкм) (формула 1) находится область максимального отражения энергии клеточной структурой листа [11, 12]. То есть высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительностью) ведет к более низким значениям коэффициентов отражения в красной зоне спектра и большим значениям в ближней инфракрасной.

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1)$$

Множество работ подтверждают взаимосвязь NDVI с продуктивностью разных типов раститель-

© Богдан Е. А., Белан Л. Н., Туктарова И. О., Вильданов И. Р., Сайфуллин И. Ю., Бахтиярова Р. С., 2024.

✉ Богдан Екатерина Александровна, e-mail: eavolkova@bk.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

ности, и за последние 30 лет – это наиболее распространенный показатель для дистанционной оценки изменения продукционного процесса во всем мире. Современные оценки взаимосвязей изменения растительности с некоторыми климатическими параметрами (в основном температура и осадки) основываются на анализе изменчивости NDVI [9, 10, 13, 15].

Для Республики Башкортостан проблема изменения климата и климатически обусловленной динамики растительности крайне актуальна. В 2021 году в Башкортостане создан карбоновый полигон [1], одной из задач которого является применение методов дистанционной оценки климатически обусловленной динамики растительного покрова.

Цель данной исследовательской работы – определение наиболее зависимых от изменения температурного режима типов растительности на участке «Геопарк Янган-Тау» (площадка «Насибаш») Евразийского карбонового полигона (Республика Башкортостан).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Участок № 6 «Геопарк Янган-Тау» Евразийского карбонового полигона расположен на северо-востоке Республики Башкортостан (Салаватский муниципальный район) (рис. 1). Выбор данной территории не случаен. Геопарк «Янган-Тау» является единственным глобальным геопарком ЮНЕСКО России и придерживается стратегии достижения цели устойчивого развития № 13 «Борьба с глобальным изменением климата» [6].

Участок кластерный и состоит из трех площадок, расположенных вблизи населенных пунктов: Насибаш, Аркаулово и Куселярово. Данное исследование представлено для площадки «Насибаш».

Территория геопарка находится в зоне лесостепи. Основными лесообразующими породами являются сосна (*Pinus sylvestris*) и береза (*Betula pendula*). Это вторичные леса, пришедшие на смену широколиственным лесам и степям. В прошлом территория геопарка была сельскохозяйственно освоена, однако в настоящее время большая часть пахотных угодий не используется. Это привело к тому, что более 12 % залежных земель геопарка зарастает лесом. Таким образом, происходит депонирование атмосферного углерода залежными землями.

Площадка «Насибаш» представляет собой зарастающие сосной залежные земли. Присутствуют 4-я (возраст деревьев – 20 и более лет), 3-я (возраст деревьев около 15 лет), 1-я (возраст деревьев до 5 лет) стадии зарастания. Часть земель используется для сенокосения. Имеется также березовые и сосново-березовые участки леса. В южной части площадки расположены посадки лесной культуры сосны.

Травянистая растительность преимущественно рудеральная с преобладанием следующих видов: короставник полевой (*Knautia arvensis*), ястребинка онежская (*Hieracium onegense*), иван-чай узколистый (*Chamaenerion angustifolium*), земляника лесная (*Fragaria vesca*), земляника зеленая (*Fragaria viridis*), бодяк щетинистый (*Cirsium*

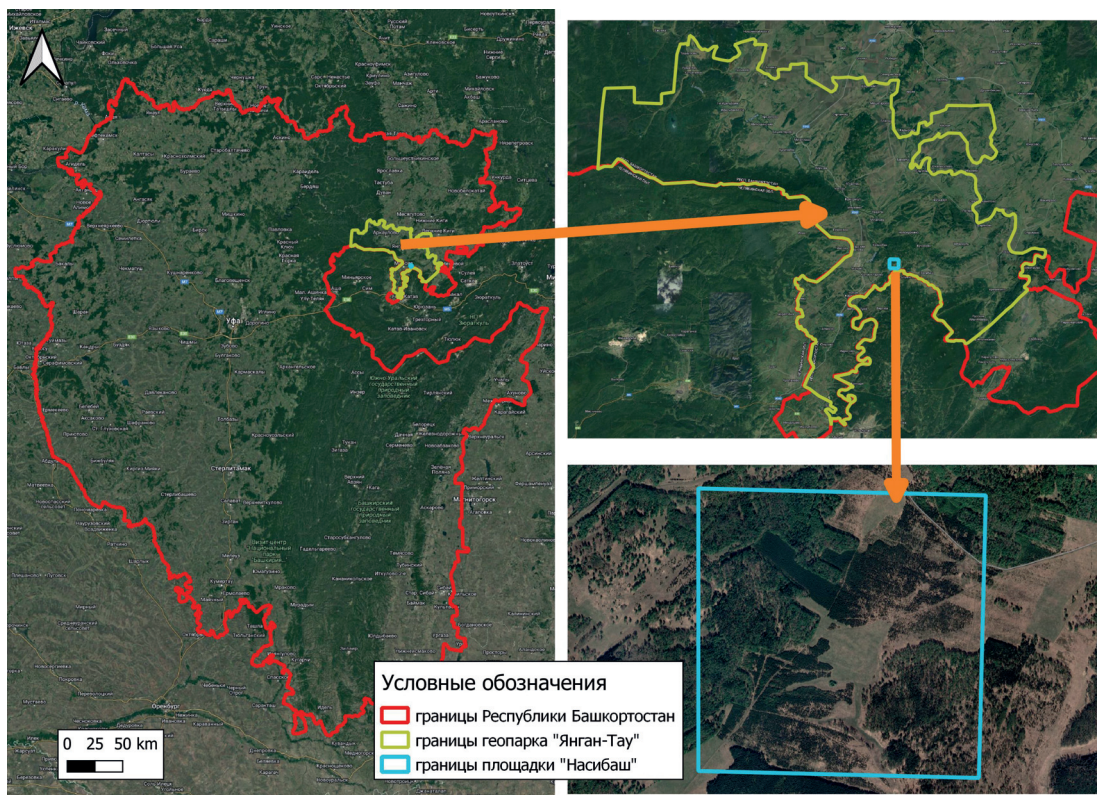


Рис. 1. Месторасположение глобального геопарка ЮНЕСКО «Янган-Тау» (желтый цвет контура) и площадки Евразийского карбонового полигона «Насибаш» (голубой цвет контура)

[Fig. 1. The location of the Yangan-Tau UNESCO global geopark (yellow contour) and the sites of the Eurasian carbon landfill «Nasibash» (blue contour)]

setosum) и др. Из злаков преобладают мятлик узколистый (*Poa angustifolia*), пырей ползучий (*Elytrigia repens*) и ежа сборная (*Dactylis glomerata*).

Был проведен анализ динамики показателя NDVI за бесснежный период (с мая по сентябрь) с 1982 по 2022 годы. Всего скачано и проанализировано 110 изображений Landsat (4-5 TM C2 L1, 7 ETM+ C2 L1, 8 OLI/TIRS C2 L1) с облачностью не более 30 %. Космические снимки были объединены в группы по 5 лет (1982-1996, 1987-1991, 1992-1996, 1997-2001, 2001-2006, 2007-2011, 2012-2016, 2017-2022) по месяцам, по причине нерегулярности съемки и погодных особенностей. Далее с использованием растрового калькулятора в программе Q-GIS построены средние значения NDVI мая, июня, июля, августа и сентября для каждой пятилетки. Кроме того, были векторизованы растры NDVI для площадки «Насибаш». Определено среднее значение, мода и медиана показателя NDVI для каждой пятилетки с мая по сентябрь (табл. 1).

Для дистанционной оценки температурного режима использовались снимки программы Landsat 8-9 (OLI/TIRS C2 L1). Всего проанализировано 36 изображений. Температура поверхности Земли определялась на основании значений тепловых каналов B10 (10,30 – 11,30 мкм) и B11 (11,50 – 12,50 мкм). Значения отражательной способности поверхности было переведено в градусы °C в программе Q-GIS с помощью модуля «Semi-Automatic classification plugin». Ранее наши исследования продемонстрировали корреляцию между наземными данными, полученными дата-логгерами, и спутниковыми снимками [8, 14].

Дальнейший анализ проводился в программе SAGA GIS. Была оценена связь температуры поверхности Земли и NDVI для каждого бесснежного месяца (май-сентябрь) (инструмент Scaterplot) с использованием усредненных изображений температуры поверхности Земли и NDVI. Оценивалась вся территория геопарка в целом для обеспечения большей выборки.

Для выделения наиболее зависимых от температурного режима участков растительности использовался инструмент Multiple Regression Analysis (Grid and Predictor Grids) позволяющий строить карты пространственного распределения коэффициента детерминации (R^2), демонстрирующего зависимость одного параметра от другого, значения которых закреплены в пикселях раstra.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика NDVI представлена в таблице и для средних значений на рисунке 2. Для мая месяца в период с 1992 по 2022 год особо изменения в среднем значении NDVI не отмечается, в то время как мода демонстрирует тенденцию к уменьшению.

Для июня характерно увеличение значения NDVI. Июль и август не демонстрируют значительных изменений, а вот среднее значения и медиана для сентября имеет тенденцию к снижению. Таким образом анализ динамики NDVI продемонстрировал увеличение тренда для июня и снижение для сентября (рис. 2).

Вместе с тем температурный режим не является единственным параметром, влияющим на значение NDVI. Также оказывают воздействие такие факторы как увлажнение территории, особенности хозяйственного использования и другие. В этой связи были проанализированы с помощью инструмента Scaterplot изображения со значениями NDVI и температурой поверхности Земли. Результаты показали, что наибольшую зависимость от температуры поверхности Земли в мае имеют значения NDVI июня (рис. 3): $R^2=0,63$. Другие месяцы такую связь не продемонстрировали.

Для определения наиболее уязвленных участков в программе SAGA GIS построена карта пространственного распределения коэффициента детерминации (R^2) для площадки «Насибаш». Значения R^2 ниже, чем для всей территории геопарка, однако есть определённая наглядность в распределении коэффициента детерминации (рис. 4).

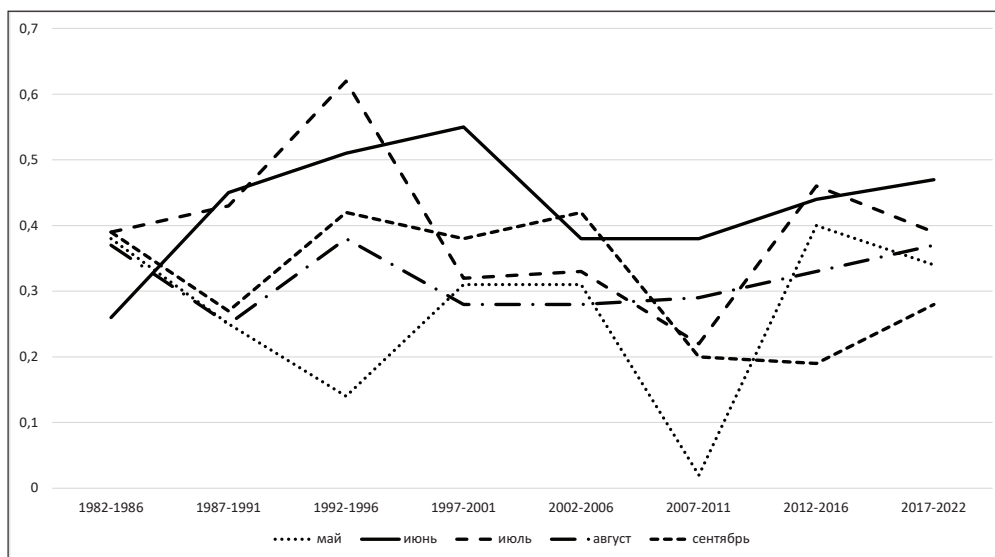


Рис. 2. Динамика NDVI в период с 1982-2022 года
[Fig. 2. Dynamics of NDVI in the period 1982-2022]

Значение показателя NDVI в бесснежный период с 1982 по 2022 годы
[Table. The value of the NDVI indicator in the snowless period from 1982 to 2022]

Пятилетка, годы / Five-year plan, years	Среднее значение / The average value	Мода / Mode	Медиана / Median
Май			
1982-1986	0,38	0,51	0,42
1987-1991	0,25	0,41	0,35
1992-1996	0,14	0,15	0,15
1997-2001	0,31	0,32	0,31
2002-2006	0,31	0,3	0,31
2007-2011	0,02	0,03	0,025
2012-2016	0,4	0,39	0,4
2017-2022	0,34	0,34	0,34
Июнь			
1982-1986	0,26	0,13	0,33
1987-1991	0,45	0,51	0,47
1992-1996	0,51	0,59	0,51
1997-2001	0,36	0,52	0,4
2002-2006	0,55	0,61	0,59
2007-2011	0,38	0,42	0,39
2012-2016	0,44	0,46	0,45
2017-2022	0,47	0,47	0,47
Июль			
1982-1986	0,39	0,43	0,41
1987-1991	0,43	0,57	0,47
1992-1996	0,62	0,66	0,61
1997-2001	0,32	0,4	0,32
2002-2006	0,33	0,39	0,34
2007-2011	0,22	0,26	0,23
2012-2016	0,46	0,47	0,46
2017-2022	0,39	0,4	0,4
Август			
1982-1986	0,37	0,36	0,36
1987-1991	0,25	0,41	0,35
1992-1996	0,38	0,49	0,36
1997-2001	0,28	0,32	0,29
2002-2006	0,28	0,21	0,28
2007-2011	0,29	0,29	0,29
2012-2016	0,33	0,325	0,33
2017-2022	0,37	0,36	0,37
Сентябрь			
1982-1986	0,39	0,25	0,4
1987-1991	0,27	0,32	0,29
1992-1996	0,42	0,49	0,49
1997-2001	0,38	0,42	0,4
2002-2006	0,42	0,45	0,42
2007-2011	0,2	0,19	0,21
2012-2016	0,19	0,18	0,18
2017-2022	0,28	0,28	0,28

Как видно на рисунке 4, наибольшую связь между NDVI и температурой поверхности земли показывают зарастающие сосной залежные земли (4 стадия зарастания), незаросшие залежные земли и сенокос. Смешанный сосново-березовый лес, а также залежные земли с 1 и 3 стадией зарастания сосной отличаются меньшей зависимостью от температурного режима.

В работе Зуева и др. (2019) [4] рассмотрены результаты трендового и корреляционного анализа температуры воздуха и вегетационного индекса NDVI за теплый пе-

риод для территории тайги и тундры Западной Сибири в 1982-2015 годах. Выявлено, что развитие растительности в теплый период в значительной степени определяется ее развитием в первый месяц теплого периода – май для тайги и июнь для тундры. Показано, что значение NDVI в мае в зоне тайги формируется под воздействием температур апреля-мая, а в июне в зоне тундры – под воздействием температур июня, однако, в последние годы в связи с потеплением вклад температур воздуха мая в формирование растительного покрова тундры увеличивается.

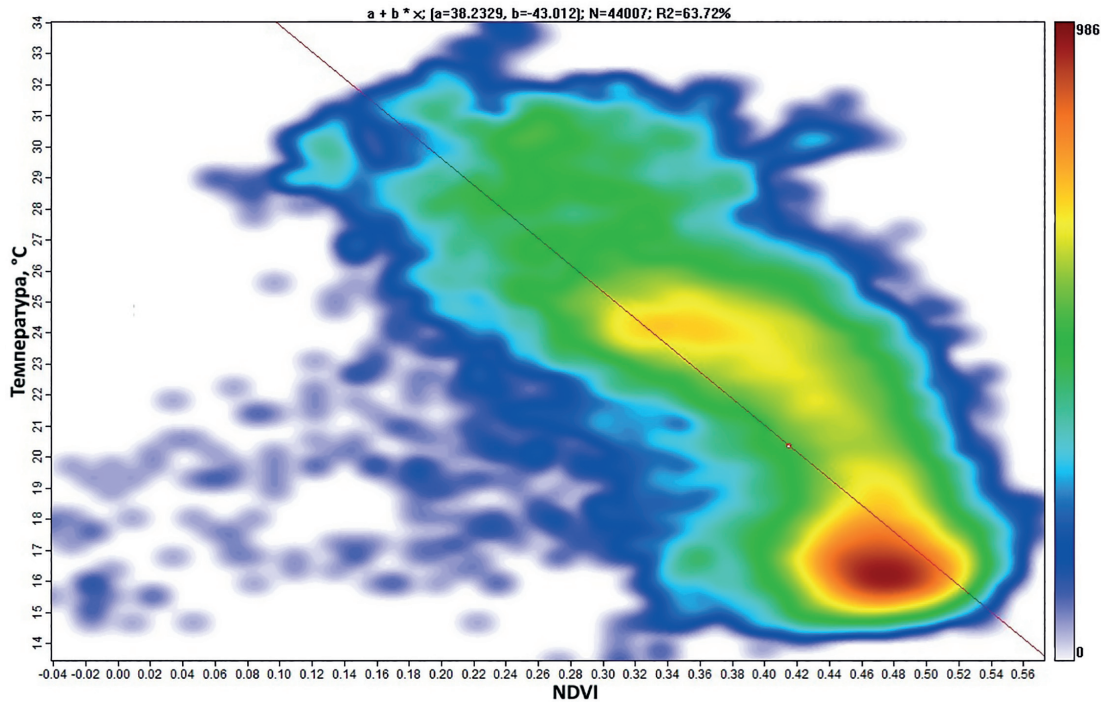


Рис. 3. Влияние температуры поверхности Земли мая месяца на NDVI июня месяца
 [Fig.3. The influence of the Earth's surface temperature in May on the NDVI of June]

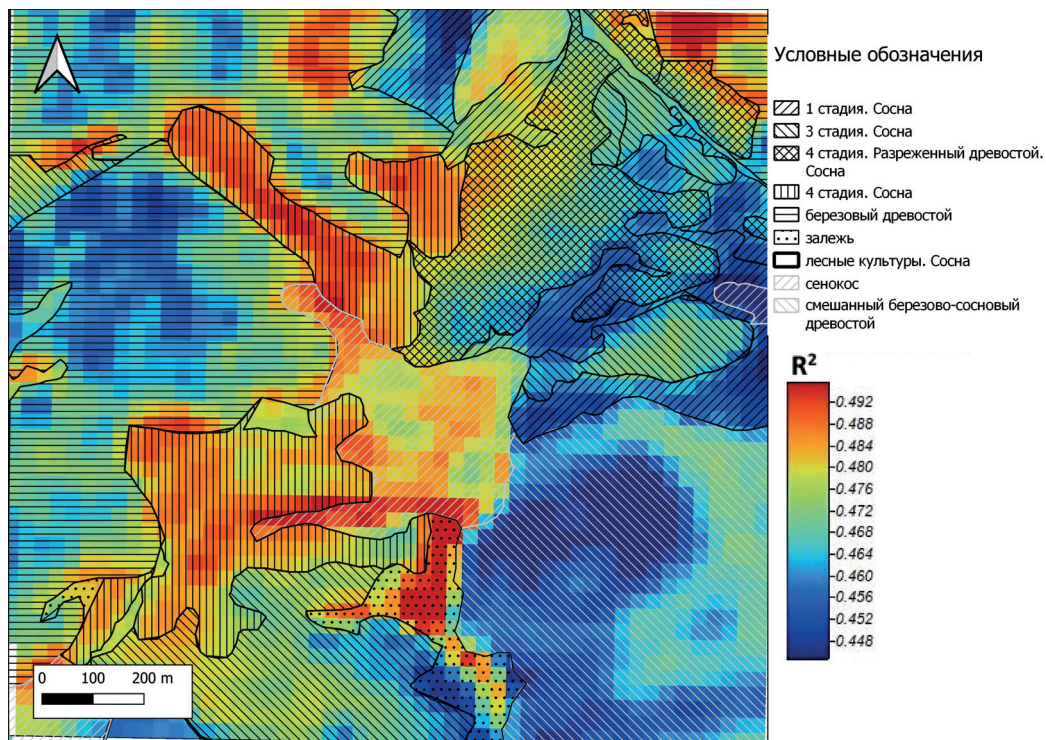


Рис. 4. Распределение коэффициента детерминации для параметров: температура поверхности Земли (предиктор) и NDVI (зависимый параметр) для площадки «Насибаш»
 [Fig. 4. Distribution of the determination coefficient for the parameters: Earth surface temperature (predictor) and NDVI (dependent parameter) for the «Nasibash» site]

Значимые коэффициенты корреляции NDVI с осредненной температурой апреля-мая и мая-июня характерны практически для всей территории региона, за исключением прибрежных северных районов в первом случае и юго-западных – во втором. В нашей работе

показано, что в зоне лесостепи NDVI июня формируется под воздействием температур мая.

В работах Адамовича и др. [2, 3] также подтверждается связь NDVI с температурным режимом территории. Были проанализированы значения NDVI с 1988 по

2016 годы для государственного природного заповедника «Нургуш». В результате выявлены низкие значения NDVI для растительных объектов при анализе снимков за 18 июля 1994 года и 7 августа 2010 года по сравнению со значениями индекса за другие годы съёмки. Это связано с низкой среднемесячной температурой воздуха (14,2 °С) и небольшим количеством осадков в 1994 году и относительно засушливым и жарким летом 2010 года (средняя температура в летний период составила 24,7 °С).

Неоднородность взаимосвязей изменения продуктивности растительности с фактором температур демонстрирует Республика Беларусь [5]. Примерно на 84% площади Беларуси наблюдается рост NDVI, а на 35% площади, преимущественно приходящейся на лесные массивы и неосвоенные территории, этот рост является статистически значимым при 5%-м уровне ошибки по критерию Стьюдента. Тем не менее, в отличие от результатов нашей работы и указанных выше исследований более значимым фактором, влияющим на значение NDVI, является количество осадков в вегетационный период, определяющее свыше 60% дисперсии их NDVI. Однако на долгосрочные изменения вегетационного индекса влияет потепление воздуха при практически неизменном количестве осадков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Климатические изменения оказывают значительное влияние как на естественные экосистемы, так и на хозяйственную деятельность человека. Для разработки стратегии адаптации к изменению климата крайне важно вести постоянный мониторинг как типичных климатических параметров: температура воздуха, осадки и др., так и отслеживать реакцию природных и антропогенных комплексов на данные изменения. Реализация поставленных задач возможна в рамках программы карбоновых полигонов. Представленные результаты исследования показали, что в настоящее время вегетационная активность растительности на участке карбонового полигона «Геопарк Янган-Тау» увеличилась с 1982 для июня месяца. Во многом это обуславливается влиянием майских температур. Наибольшую устойчивость к изменениям температурного режима продемонстрировали участки, находящиеся в 1 и 3 стадии зарастания сосной. Полученные результаты могут быть использованы при планировании карбоновых ферм, лесохозяйственных мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакумов Е.В., Поляков В.И., Чуков С.Н. Подходы и методы изучения органического вещества почв карбоновых полигонов России (обзор) // *Почвоведение*, 2022, №7, с. 773-772.
2. Адамович Т.А., Ашихмина Т.Я., Кантор Г.Я. Использование различных комбинаций спектральных каналов космических снимков спутника Landsat 8 для оценки природных сред и объектов (обзор) // *Теоретическая и прикладная экология*, 2017, № 2, с. 9-18.
3. Анализ сезонной и многолетней динамики вегетационного индекса NDVI на территории государственного при-

родного заповедника «Нургуш» / Т.А. Адамович, Г.Я. Кантор, Т.Я. Ашихмина, В.П. Савиных // *Теоретическая и прикладная экология*, 2018, № 1, с. 18-24.

4. Зуев В.В., Короткова Е.М., Павлинский А.В. Климатически обусловленные изменения растительного покрова тайги и тундры Западной Сибири в 1982-2015 гг. по данным спутниковых наблюдений // *Исследование Земли из космоса*, 2019, № 6, с. 66-76.

5. Лысенко С.А. Климатообусловленные изменения биопродуктивности наземных экосистем Беларуси // *Исследование Земли из космоса*, 2019, № 6, с. 77-88.

6. Методика инвентаризации объектов геологического наследия как инструмент управления геопарками / Е.А. Богдан, Л.Н. Белан, И.В. Фролова, А.Ф. Галиев // *Устойчивое развитие горных территорий*, 2022, т. 14, № 2 (52), с. 209-217.

7. Barbosa H.A., Huete A.R., Baethgen W.E. A 20-year study of ndvi variability over the northeast region of brazil // *Arid environment*, 2006, vol. 67, pp. 288-307.

8. Changing climatic indicators and mapping of soil temperature using Landsat data in the Yangan-Tau UNESCO global geopark / E. Bogdan, R. Kamalova, A. Suleymanov, L. Belan et al. // *SOCAR Proceeding*, 2022, no. 2, pp. 32-41

9. Forecast changes in the productivity of plant communities in the pre-urals steppe site of the Orenburg state nature reserve (Russia) in extreme drought conditions using NDVI / N. Fedorov, T. Zharkikh, O. Mikhailenko, R. Bakirova et al. // *Nature Conservation Research*, 2019, vol. 4, pp. 104-110.

10. Kariyeva J., Leeuwen W. Environmental drivers of NDVI-based vegetation phenology in Central Asia // *Remote Sensing*, 2011, vol. 3, pp. 203-246.

11. NDVI changes in the Arctic: Functional significance in the moist acidic tundra of Northern Alaska / R. Jespersen, M. Anderson-Smith, P. Sullivan, R. Dial et al. // *PLoS one*, 2023, vol. 18, pp. e0285030.

12. NDVI, scale invariance and the modifiable areal unit problem: An assessment of vegetation in the Adelaide Parklands / N. Hamideh, Sh. Anderson, P. Sutton, S. Beecham et al. // *Science of The Total Environment*, 2017, vol. 584-585, pp. 11-18.

13. Relationship between satellite derived land surface temperatures, arctic vegetation types, and NDVI / M. Reynolds, J. Comiso, A. Balsler, D. Verbyla // *Remote Sensing of Environment*, 2008, vol. 112, pp. 1884-1894.

14. Remote Assessment of Soil Temperature on the Example of a Carbon Landfill Site of the Republic of Bashkortostan (Yangan-Tau Geopark) / E. Bogdan, A. Volkov, L. Belan, R. Kamalova et al. In *Proceedings of the 1st International Conference on Methods, Models, Technologies for Sustainable Development*, 2022, vol. 1, pp. 215-221.

15. Spatio-temporal patterns of NDVI and its influencing factors based on the ESTARFM in the Loess Plateau of China / X. Fan, G. Peng, T. Biqing, Ch.Wu et al. // *Remote Sensing*, 2023, vol. 15, pp. 2553.

16. Zuo H., Lou Yu., Li Zh. Spatiotemporal Variation of Hourly Scale Extreme Rainstorms in the Huang-Huai-Hai Plain and Its Impact on NDVI // *Remote Sensing*, 2023, vol. 15, pp. 2778.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 01.08.2023

Принята к публикации: 30.08.2024

Assessment of the Influence of the Earth's Surface Temperature on NDVI by the Example of the Yangan-Tau Geopark

E.A. Bogdan^{1,2} ✉, L.N. Belan^{1,2}, I.O. Tuktarova¹, I.R. Vildanov^{1,2},
I.Yu. Saifullin^{1,2}, R.S. Bakhtiyarova¹

¹Ufa State Petroleum Technological University, Russian Federation
(450064, Ufa, Kosmonavtov Str., 1)

²Ufa University of Science and Technology, Russian Federation
(450076, Ufa, Zaki Validi Str., 32)

Abstract. The purpose is to determine the types of vegetation most dependent on changes in the temperature regime at the Yangan-Tau Geopark (Nasibash site) of the Eurasian carbon polygon (Republic of Bashkortostan).

Materials and methods. The dynamics of the NDVI indicator from May to September from 1982 to 2022 was analyzed using 110 Landsat images with the association in groups of 5 years. The average value, mode and median of the NDVI indicator for each five-year period are determined. Images of the Landsat 8-9 program were used for remote assessment of the temperature regime. In the SAGA GIS program, the relationship between the Earth's surface temperature and NDVI for each snowless month was evaluated using averaged images of the Earth's surface temperature and NDVI. The maps of the spatial distribution of the determination (r^2) coefficient are constructed.

Results and discussion. The month of June is characterized by an increase in the NDVI value. The months of May, July and August do not show significant changes, but the average and median values for the month of September tend to decrease. The greatest relationship between NDVI and the temperature of the Earth's surface is shown by fallow lands overgrown with pine (stage 4 of overgrowth), not overgrown fallow lands and haymaking.

Conclusions. Vegetative activity of vegetation on the site of the carbon polygon «Yangan-Tau Geopark» has increased since 1982 in June, due to the influence of temperature in May. The areas in the 1st and 3rd stages of pine overgrowth have demonstrated the greatest resistance to changes in the temperature regime.

Key words: climate change, carbon polygon, NDVI, Earth surface temperature, Yangan-Tau UNESCO global geopark

Funding: The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the topic "Assessment of the volume of greenhouse gas emission and absorption by representative types of ecosystems in the areas of the Eurasian Carboniferous Polygon and search for optimal technological solutions for decarbonisation of the Republic of Bashkortostan" (Publication number: FEUR-2022-0001)

For citation: Bogdan E.A., Belan L.N., Tuktarova I.O., Vildanov I.R., Saifullin I.Yu., Bakhtiyarova R.S. Assessment of the Influence of the Earth's Surface Temperature on NDVI by the Example of the Yangan-Tau Geopark. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 2024, no. 3, pp. 14-21 (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/3/14-21>

REFERENCES

1. Abakumov E.V., Polyakov V.I., Chukov S.N. Podxody i metody izucheniya organicheskogo veshhestva pochv karbonovykh poligonov Rossii (obzor) [Approaches and methods for studying organic matter of soils of carbon polygons in Russia (review)]. *Pochvovedenie*, 2022, no. 7, pp. 773-772. (In Russ.)
2. Adamovich T.A., Ashixmina T.Ya., Kantor G.Ya. Ispolzovanie razlichnykh kombinacij spektralnykh kanalov kosmicheskikh snimkov sputnika Landsat 8 dlya ocenki prirodnykh sred i ob'ektov (obzor) [The use of various combinations of spectral channels of satellite images of Landsat 8 for the assessment of natural environments and objects (overview)]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2017, no. 2, pp. 9-18. (In Russ.)
3. Analiz sezonnoj i mnogoletnej dinamiki vegetacionnogo indeksa NDVI na territorii osudarstvennogo prirodnogo zapovednika «Nurgush» [Analysis of seasonal and long-term dynamics of the vegetation index NDVI on the territory of the state Nature Reserve «Nurgush»] / T.A. Adamovich, G.Ya. Kantor, T.Ya. Ashixmina, V.P. Savinyx. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2018, no. 1, pp. 18-24.15. (In Russ.)
4. Zuev V.V., Korotkova E.M., Pavlinskij A.V. Klimaticheski obuslovlenny'e izmeneniya rastitel'nogo pokrova tajgi i tundry Zapadnoj Sibiri v 1982-2015 gg. po dannym sputnikovyx nablyudenij [Climatically determined changes in the vegetation cover of the taiga and tundra of Western Siberia in 1982-2015 according to satellite observations]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2019, no. 6, pp. 66-76. (In Russ.)
5. Lysenko S.A. Klimatoobuslovlenny'e izmeneniya bioproduktivnosti nazemnykh ekosistem Belarusi [Climate-conditioned changes in the bioproductivity of terrestrial ecosystems of Belarus]. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, 2019, no. 6, pp. 77-88. (In Russ.)
6. Metodika inventarizacii ob'ektov geologicheskogo naslediya kak instrument upravleniya geoparkami [Methodology of inventory of geological heritage sites as a tool for managing geoparks] / E.A. Bogdan, L.N. Belan, I.V. Frolova, A.F. Galiev. *Ustojchivoe razvitiye gornyh territorij*, 2022, vol. 14, no. 2 (52), pp. 209-217. (In Russ.)



7. Barbosa H.A., Huete A.R., Baethgen W.E. A 20-year study of ndvi variability over the northeast region of Brazil. *Arid environment*, 2006, vol. 67, pp. 288-307.

8. Changing climatic indicators and mapping of soil temperature using Landsat data in the Yangan-Tau UNESCO global geopark / E. Bogdan, R. Kamalova, A. Suleymanov, L. Belan et al. *SOCAR Proceeding*, 2022, no. 2, pp. 32-41

9. Forecast changes in the productivity of plant communities in the pre-urals steppe site of the Orenburg state nature reserve (Russia) in extreme drought conditions using NDVI / N. Fedorov, T. Zharkikh, O. Mikhailenko, R. Bakirova et al. *Nature Conservation Research*, 2019, vol. 4, pp. 104-110.

10. Kariyeva J., Leeuwen W. Environmental drivers of NDVI-based vegetation phenology in Central Asia. *Remote Sensing*, 2011, vol. 3, pp. 203-246.

11. NDVI changes in the Arctic: Functional significance in the moist acidic tundra of Northern Alaska / R. Jespersen, M. Anderson-Smith, P. Sullivan, R. Dial et al. *PLoS one*, 2023, vol. 18, pp. e0285030.

12. NDVI, scale invariance and the modifiable areal unit problem: An assessment of vegetation in the Adelaide Parklands / N. Hamideh, Sh. Anderson, P. Sutton, S. Beecham et al. *Science of The Total Environment*, 2017, vol. 584-585, pp. 11-18.

13. Relationship between satellite derived land surface temperatures, arctic vegetation types, and NDVI / M. Reynolds, J. Comiso, A. Balsler, D. Verbyla. *Remote Sensing of Environment*, 2008, vol. 112, pp. 1884-1894.

14. Remote Assessment of Soil Temperature on the Example of a Carbon Landfill Site of the Republic of Bashkortostan (Yangan-Tau Geopark) / E. Bogdan, A. Volkov, L. Belan, R. Kamalova et al. *In Proceedings of the 1st International Conference on Methods, Models, Technologies for Sustainable Development*, 2022, vol. 1, pp. 215-221.

15. Spatio-temporal patterns of NDVI and its influencing factors based on the ESTARFM in the Loess Plateau of China / X. Fan, G. Peng, T. Biqing, Ch. Wu et al. *Remote Sensing*, 2023, vol. 15, pp. 2553.

16. Zuo H., Lou Yu., Li Zh. Spatiotemporal Variation of Hourly Scale Extreme Rainstorms in the Huang-Huai-Hai Plain and Its Impact on NDVI. *Remote Sensing*, 2023, vol. 15, pp. 2778.

Conflict of interests: The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 01.08.2023

Accepted: 30.08.2024

Богдан Екатерина Александровна
кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории мониторинга климатических изменений и углеродного баланса экосистем Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-0566-2639, e-mail: eavolkova@bk.ru

Белан Лариса Николаевна
доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры Охраны окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-3098-7881, e-mail: belan77767@mail.ru

Туктарова Ирэн Ольвертовна
кандидат технических наук, заведующая кафедрой охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-4731-1394, e-mail: umrko@mail.ru

Вильданов Ильдар Радикович
младший научный сотрудник лаборатории мониторинга климатических изменений и углеродного баланса экосистем Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-6312-3241, e-mail: ildar.vildanov.89@mail.ru

Сайфуллин Ирик Юлаевич
кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории мониторинга климатических изменений и углеродного баланса экосистем Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-2017-6516, e-mail: irekle@mail.ru

Бахтиярова Роза Сагитовна
кандидат технических наук, доцент кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Уфа, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-2189-4539, e-mail: rozaishakova@yandex.ru

Ekaterina A. Bogdan
Cand. Sci. (Econ.), Leading Researcher at the Laboratory for Monitoring Climate Change and Carbon Balance of Ecosystems of the Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-0566-2639, e-mail: eavolkova@bk.ru

Larisa N. Belan
Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor at the Department of Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources of the Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-3098-7881, e-mail: belan77767@mail.ru

Irene O. Tuktarova
Cand. Sci. (Tech.), Head of the Department of Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources of the Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-4731-1394, e-mail: umrko@mail.ru

Ildar R. Vildanov
Junior Research Assistant at the Laboratory for Monitoring Climate Change and Carbon Balance of Ecosystems of the Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-6312-3241, e-mail: ildar.vildanov.89@mail.ru

Irik Yu. Sayfullin
Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher at the Laboratory for Monitoring Climate Change and Carbon Balance of Ecosystems of the Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-2017-6516, e-mail: irekle@mail.ru

Rosa S. Bakhtiyarova
Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. at the Department of Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources of the Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-2189-4539, e-mail: rozaishakova@yandex.ru