

ДИНАМИКА ПРОДУКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕННОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА «ЧЕРНОГОРСКИЙ» ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ TERRA/MODIS

А.А. Жуков[✉], Е.Ю. Жукова

ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет имени Н.Ф. Катанова», Россия, 655017, Республика Хакасия, г. Абакан, пр-кт Ленина, д. 90

zhukov_aa@khsu.ru

Выявлены основные закономерности многолетней и сезонной динамики продуктивности, индекса листовой поверхности и эвапотранспирации растительных сообществ на рекультивированных отвалах угольного разреза «Черногорский» в период с 2001 по 2021 гг. по спутниковым данным Terra/MODIS. Выявлена положительная тенденция развития растительности на отвалах. Продуктивность и индекс листовой поверхности фитоценозов коррелируют. Данные Terra/MODIS занижают реальную фитомассу.

Ключевые слова: продуктивность, спектральные индексы, динамика растительности, Terra/MODIS, угольный разрез «Черногорский»

Ссылка для цитирования: Жуков А.А., Жукова Е.Ю. Динамика продуктивности восстановленной растительности угольного разреза «Черногорский» по спутниковым данным Terra/MODIS // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 2. С. 96–103. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-2-96-103

Экологическое восстановление и рекультивация отвалов территорий горнодобывающих предприятий стали приоритетными направлениями стратегий устойчивого развития многих стран [1–4]. Для мониторинга сукцессионных процессов в растительности активно применяются дистанционные методы, в том числе, архивные данные [5–7]. Растительность на рекультивированных отвалах разреза «Черногорский» можно рассматривать как модель сукцессионных процессов в фитоценозах в семиаридных условиях.

Цель работы

Цель работы — выявление особенностей многолетней и сезонной динамики продуктивности восстановленной растительности отвала угольного разреза «Черногорский».

Объекты и методы исследования

Разрез располагается в Южно-Минусинской впадине на территории Абаканского степного района. Климат района исследования резко континентальный, с неблагоприятными для сельского хозяйства амплитудами температуры воздуха: июль — 19,4, январь — минус 21,5 °С и скудным количеством осадков (250 мм) [8]. Рельеф отвала холмистый, высота до 408 м н. у. м. Техногенный элювий отвала представлен преимущественно песчаниками с примесью аргиллитов и алевролитов.

Растительность изучали общепринятыми геоботаническими методами 2–3 раза за вегетацион-

ный сезон 2021 г. Исследовали структуру сообществ, видовой состав, проективное покрытие, жизненность и фенофазы. Надземную фитомассу определяли методом укусов в четырехкратной повторности в сыром и воздушно-сухом состоянии. Срезанную фитомассу разделяли по ботаническим хозяйственным группам: осоки, злаки, бобовые, полины, разнотравье, а также ветошь и мортмасса. Взвешивали на весах с точностью до 0,01 г в сыром виде, затем высушивали до воздушно-сухого состояния и взвешивали повторно [9–11].

Для исследования многолетних и сезонных изменений растительности был выбран участок в центре отвала с подходящими размерами (координаты 53,74978°; 91,0681°). Динамика растительности оценивалась с 23 апреля по 8 октября в течение 2001–2021 гг. Для анализа использовали 8-дневные композитные обработанные данные версии 6.1 спутника Terra/MODIS с сайта AppEEARS [12]:

1) композитные данные с кодом MOD17A2HGF (GPP — Gross Primary Productivity, валовая первичная продукция), вычисленные по концепции эффективности использования излучения (кг/м²) [13].

2) MOD16A2GF (PET — Total Potential Evapotranspiration и ET — Total Evapotranspiration — потенциальная и актуальная эвапотранспирация, вычисленная по уравнению Пенмана — Монтейта, кг/м²) [14].

3) MCD15A2H (версия 6) включала в себя комбинированную долю фотосинтетически активного излучения (FPAR — Fraction of Photosynthetically Active Radiation) и индекс листовой поверхности

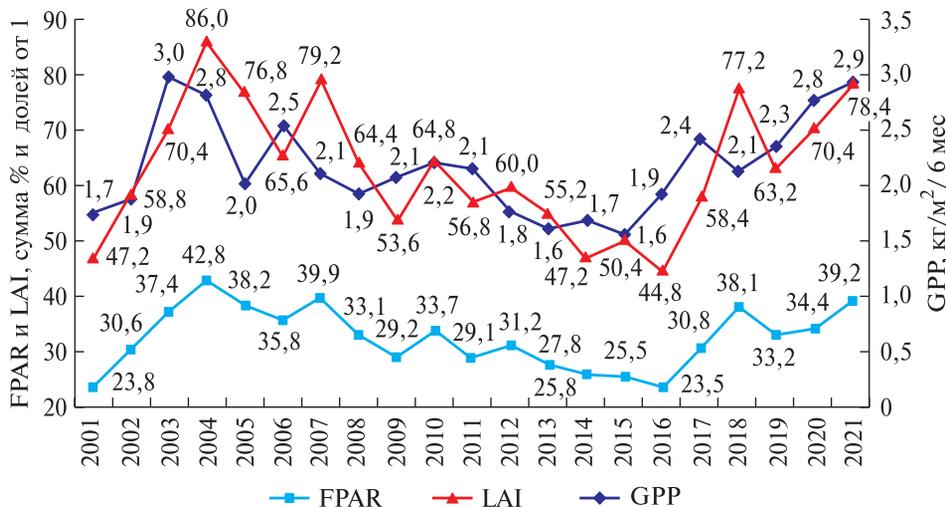


Рис. 1. Многолетняя динамика продуктивности, доли фотосинтетически активного излучения и индекса листовой поверхности восстановленной растительности на отвале

Fig. 1. Long-term dynamics of productivity, fraction of photosynthetically active radiation and leaf area index of restored vegetation at the dump site

(LAI — Leaf Area Index). LAI — это отношение площади земли к площади всех поверхностей зеленых листьев. FPAR — доля падающего фотосинтетически активного излучения (400...700 нм), поглощаемого фотосинтезирующими элементами растительного покрова, % [15].

Вычисление суммарных показателей для GPP, PET и ET проводилось путем интегрирования вегетационной линии, для FPAR и LAI — путем суммирования данных.

В программе AtteStat выполнена оценка одномерного временного ряда GPP нелинейным методом декомпозиции — сингулярным спектральным анализом (SSA — Singular spectrum analysis) [16]. Метод подходит для исследования стационарных и нестационарных временных рядов и позволяет определить линейные и нелинейные тенденции изменения показателей временного ряда, провести сглаживание данных, при котором отфильтровывают шум и преобразуют ряд в ровную кривую [16–18].

Результаты и обсуждение

На территории Хакасии активно развивается угледобывающая отрасль, и имеются значительные площади рекультивированных отвалов. Растительность, формирующаяся на отвалах угольных разрезов, в процессе роста ассимилирует углекислый газ. Использование спутниковых снимков позволяет произвести дистанционную оценку круговорота углерода для данных сообществ через продуктивность, решает проблему регулярности, точности и независимости данных. В данной работе были рассмотрены динамические изменения вычислений показателей продуктивности, фотосинтетически активной

радиации и индекса листовой поверхности на примере данных Terra/MODIS.

Как видно из рис. 1, в 2003 и в 2021 гг. валовая продуктивность и зависящий от нее индекс листовой поверхности достигали наибольших значений. Средние показатели за этот период для GPP составили $2,2 \pm 0,1$ кг/м² за 6 мес., FPAR $32,5 \pm 1,2$ % и LAI $63,3 \pm 2,6$. Плавный характер кривой продуктивности, за редкими исключениями, говорит о стабильном развитии растительности на исследуемом отвале. Индекс листовой поверхности коррелирует с валовой продуктивностью.

Изменения FPAR могут зависеть не только от метеорологических явлений, но и от содержания пылевых частиц в воздухе над территорией, так как чем прозрачнее атмосфера, тем больше FPAR получают растения и тем выше их продуктивность. Кроме того, на этот показатель влияет пылеудерживающая способность вегетирующих растений.

Кратко охарактеризуем состояние растительности в вегетационный сезон 2021 г. На территории исследования распространены простые фитоценозы, в большей степени ломкоколосниковые и вейниковые луга с вязом приземистым, их закустаренные варианты и травянистые сообщества в чистом виде. В меньшей степени распространены мятликовые, пырейные, солончико-злаковые и полынно-злаково-солончико-злаковые, разнотравно-злаковые остепненные луга. Распространены также насаждения облепихи крушиновидной с вязом. Видовое разнообразие сообществ составляет более 10 видов. Среднее проективное покрытие около 65 %, иногда может достигать 80 %. Условия формирования сообществ благоприятные и умеренно благоприятные — участки выровненные, имеют северную, западную и восточную ориентации [19].

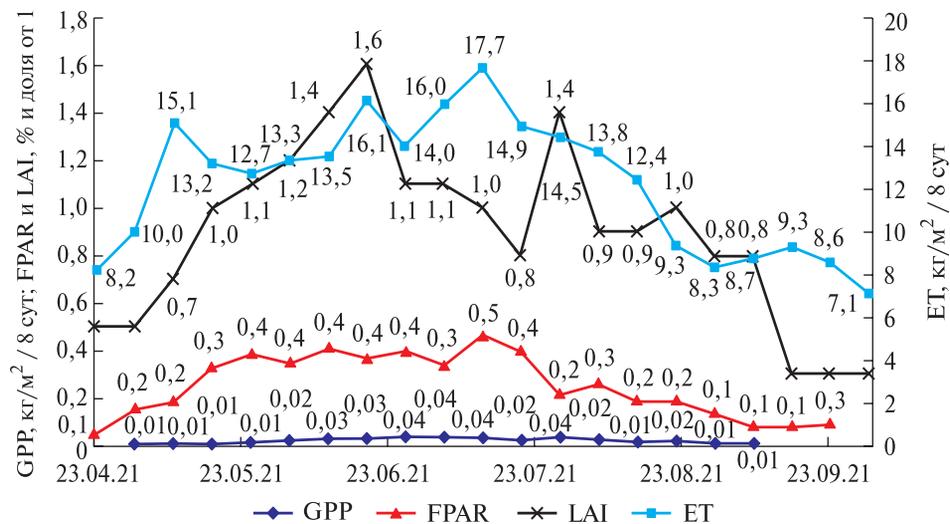


Рис. 2. Сезонная динамика продуктивности, доли фотосинтетически активного излучения и индекса листовой поверхности восстановленной растительности на отвале, 2021 г.
 Fig. 2. Seasonal dynamics of productivity, fraction of photosynthetically active radiation and leaf area index of restored vegetation at the dump site, 2021

Результаты регрессионного анализа спутниковых данных
Results of satellite data regression analysis

Взаимосвязь	Коэффициент детерминации R ²	Уравнения регрессии для оценки влияния независимой величины x на зависимую величину y
GPP и FPAR	0,329	$y = -16,162x^3 + 105,24x^2 - 210,95x + 159,15$ (полином)
GPP и LAI	0,457	$y = 38,024x^{0,6521}$ (степенная функция)
GPP и ET	0,403	$y = -469,44x^2 + 2477,2x - 1521,3$ (полином)
GPP и PET	0,350	$y = 189,25x^3 - 452,93x^2 - 1310x + 9470,8$ (полином)

Спад продуктивности с 2003 до 2015 гг. частично связан с изменением количества поступающей фотосинтетически активной радиации и суммы осадков. Эвапотранспирация за период исследования в целом с 2001 по 2021 гг. составила 1557 ± 270 кг/м², для потенциальной эвапотранспирации — 6578 ± 367 кг/м². Достоверного снижения PET не отмечено, что свидетельствует об относительной стабильности водного баланса данного отвала. В периоды с 2000 по 2003 гг. и с 2012 по 2015 гг. зафиксировано снижение суммарной эвапотранспирации в связи с засухой в районе исследования, поскольку одновременно здесь наблюдалось и снижение продуктивности.

Сезонная динамика хода кривой валовой продуктивности восстановленных сообществ и наличие одного выраженного пика показали лугово-степной характер растительности отвала (рис. 2).

Максимальные значения GPP приходятся на период с 26.06.2021 г. по 28.07.2021 г. (0,04 кг/м² за 8 сут). Также наблюдали единовременное снижение показателей до 0,02 кг/м² за 8 сут, связанное с ливневыми осадками и изменением архитектуры растительности, при этом эвапо-

транспирация увеличивалась, а индекс листовой поверхности уменьшался. Аналогичный пик был зафиксирован 13.08.2021 г. Наибольший период роста отмечался с 01.05.2021 г. по 10.06.2021 г., снижение продуктивности — с 21.08.2021 г. по 22.09.2021 г.

Данные по продуктивности восстановленной растительности сильно занижены вследствие обильного накопления ветоши светлого цвета, отражающей часть солнечного спектра. Например, за 31.07.2021 г. для ломкоколосникового луга вес общей надземной сырой (сухой) фитомассы составил 1,31 (0,98) кг/м², из них соответственно злаки, ветошь и мортмасса — 0,56 (0,35), 0,17 (0,15) и 0,59 (0,49) кг/м², ошибка среднего арифметического была в пределах 0,01...0,07 кг/м². В то же время по Terra/MODIS валовая продуктивность была всего 0,04 кг/м² за 8 сут. Обильная ветошь и мортмасса защищали почву от перегрева, эрозии и иссушения, но одновременно являлись препятствием для произрастания местных видов.

Корреляция данных Terra/MODIS между продукционными и метеорологическими данными позволяет выявить наиболее значимые факторы, влияющие на сукцессии (таблица).

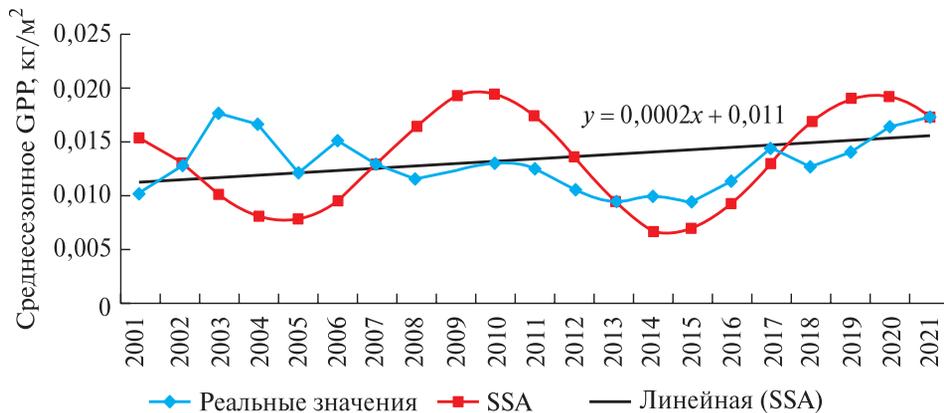


Рис. 3. Анализ временного ряда GPP растительности отвала
 Fig. 3. Analysis of the time series GPP of the dump site vegetation

Как видно из таблицы, между всеми показателями выявлена средняя положительная зависимость, описываемая в основном полиномиальными уравнениями. На продуктивность наиболее значимо влияют LAI и эвапотранспирация (ET).

Анализ временного ряда методом SSA показал слабовыраженную положительную тенденцию и наличие циклических значений GPP за 20-летний период (рис. 3).

Сравнение рассчитанных показателей продуктивности со среднесезонными значениями GPP по данным Terra/MODIS не выявили сильной зависимости, что объясняется, с одной стороны, методом расчетов, с другой — работы по биологической рекультивации на данном участке начались в 2000-х годах и вследствие этого ветошь не занижала показатели GPP, а проективное покрытие фитоценозов за 2 года быстро увеличилось. После 2006 г. колебания продуктивности с увеличением амплитуды значений GPP приближались к расчетным. Исходя из характера кривой, вычисленной методом SSA, ближайшие три года продуктивность растительности будет снижаться, затем увеличиваться. При наличии дополнительных данных, возможно уточнение прогнозируемой модели для получения достоверных результатов по секвестированию углерода в рекультивируемых экосистемах.

Выводы

Высокую фитомассу восстановленной растительности рассматриваемого отвала отмечали многие исследователи [20–22].

Помимо практического применения высокой продуктивности растительности существует возможность ускорения восстановления биологического разнообразия отвалов до 30–40 видов степных растений за срок до шести лет с использованием природоподобной технологии рекультивации [23–25]. Например, перенесение верхнего живородящего слоя почвы на отвал, минуя стадию

буртования, позволяет создать природоподобное растительное сообщество с высоким видовым разнообразием, что не достигается при самозарастании отвала за несколько десятилетий [25].

Спутниковые данные Terra/MODIS, в частности GPP, применяли в качестве предикторов окружающей среды для построения моделей и прогностических карт биоразнообразия растений с высокой точностью [26].

Результаты исследований показали, что наибольших значений валовая продуктивность и зависящие от нее показатели по данным Terra/MODIS достигали в 2003 и в 2021 гг. Средние показатели за период 2001–2021 гг. для GPP составили $2,2 \pm 0,1$ кг/м² за 6 мес., при этом данные значительно занижены. Анализ потенциальной и актуальной эвапотранспирации не выявил достоверного снижения оводненности растений на этой территории. Установлены положительные тенденции продуктивности сообществ.

Связывание диоксида углерода растениями является основным способом снижения возрастающей концентрации CO₂ в атмосфере и темпов глобального потепления. Отвалы угольных месторождений могут являться карбоновыми фермами, на которых будут изучать условия поглощения CO₂, депонирование углерода, за счет чего возможно снижение углеродного следа угледобывающих предприятий [27].

Вопросами рационального и полного использования энергии биомассы занимаются правительства и научно-исследовательские институты, как в нашей стране, так и за рубежом. Изучение вопросов использования растительной ветоши и древесно-веточного материала может быть актуальным для выбора видов биомассы и оценки эффективности совместного сжигания биомассы и угля на электростанциях, работающих на биомассе, что снижает углеродный след предприятий [28]. Изъятие ветоши и некондиционной древесины с территории отвала будет способствовать

ускорению сукцессии, так как появится пространство для прорастания местных видов и снизится риск пожаров.

В целом, отвалы горных пород угольных разрезов обладают высокой экологической емкостью, которая определяется технологией рекультивации и грунтом. Большинство зональных древесно-кустарниковых видов (в особенности, неприхотливые виды, такие как береза, сосна и облепиха) способны заселять и произрастать на отвалах угольного разреза. Анализ искусственного возобновления показывает возможность экономически выгодного целевого плантационного выращивания различных древесных пород. Ограничивают зарастание отвалов лесом весенние пожары, которые распространяются по ветоши [29].

Восстановленные леса на старых угольных рудниках в южных Аппалачах имеют потенциал связывания углерода на несколько порядков выше, чем типичные стратегии для компенсации углерода. Прогнозы показывают, что данный регион может быть углеродно-нейтральным или небольшим поглотителем, если будет реализовано широкомасштабное восстановление лесов [30]. Как пример, в Китае, согласно прогнозам, рудник Нантун сократит потери углерода на связывание на 72,29 % за счет рекультивационных мероприятий [31]. В этой стране также предложен комплексный подход к депонированию углерода в результате фотосинтеза на заброшенных угольных шахтах [32]. Восстановление растительного покрова отвалов угольного рудника в Индии увеличивало депонирование углерода за счет подземной биомассы в 1,3, 7,6 и 17,2 раза, в то время как содержание органического углерода в почве увеличивалось в 1,3, 2,5 и 3,1 раза через 2, 6 и 12 лет зарастания растительностью соответственно [33].

Значительная продуктивность и стадии сукцессии восстановленной растительности на отвале угольного разреза «Черногорский» являются основанием для включения участка в перечень перспективных для организации карбоновых полигонов территорий в Республике Хакасия, а также проведения мониторинга в условиях семиаридного климата.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Министерства образования и науки Республики Хакасия (Соглашение № 94 от 13.12.2022 г.). Научно-исследовательский проект «Оценка секвестрации углерода растительностью техногенно-нарушенных территорий Республики Хакасия», в рамках мероприятия Программы деятельности научно-образовательного центра мирового уровня «Енисейская Сибирь»

«Региональная сеть карбоновых полигонов для долговременных наблюдений потоков парниковых газов, тепла и влаги». Выражаем благодарность научному руководителю, профессору, д-ру биол. наук, директору Кузбасского ботанического сада А.Н. Куприянову, канд. биол. наук О.А. Куприянову и коллективу лаборатории рекультивации Института угля и углехимии СО РАН (г. Кемерово) за помощь в проведении исследований. Также благодарим за содействие в организации исследований ООО «СУЭК-Хакасия» и лично главного эколога Е.В. Маркову и инженера-исследователя лаборатории рекультивации земель ФГБНУ «НИИ аграрных проблем Хакасии» Е. А. Моршнева.

Список литературы

- [1] Huang L., Zhang P., Hu Y., Zhao Y. Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mines // Ecological Engineering, 2016, v. 94, pp. 638–646. DOI:10.1016/j.ecoleng.2016.06.108
- [2] Li X., Lei S., Liu F., Wang W. Analysis of Plant and Soil Restoration Process and Degree of Refuse Dumps in Open-Pit Coal Mining Areas // International J. of Environmental Research and Public Health, 2020, v. 17(6), p. 1975. DOI:10.3390/ijerph17061975
- [3] Yanjun G., Juan W., Wei Z., Zhongke B., Yingui C. Identification of land reclamation stages based on succession characteristics of rehabilitated vegetation in the Pingshuo opencast coal mine // J. of Environmental Management, 2022, v. 305, pp. 114–352. DOI:10.1016/j.jenvman.2021.114352
- [4] Alday J.G., Marrs R.H., Mart'inez-Ruiz C. Vegetation succession on reclaimed coal wastes in Spain: the influence of soil and environmental factors // Applied Vegetation Science, 2011, v. 14, pp. 84–94. DOI: 10.1111/j.1654-109X.2010.01104.x
- [5] Зеньков И.В., Юронен Ю.П., Карачева Г.А., Стукова О.О., Кирюшина Е.В., Миронова Ж.В., Веретенова Т.А. Использование результатов дистанционного зондирования в оценке восстановления экосистемы на территориях с открытой угледобычей в регионах Урала // Уголь, 2020. № 10. С. 68–71. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-10-68-71
- [6] Safonova A., Hamad Y., Dmitriev E., Georgiev G., Trenkin V., Georgieva M., Dimitrov S., Iliev M. Individual Tree Crown Delineation for the Species Classification and Assessment of Vital Status of Forest Stands from UAV Images // Drones, 2021, no. 5, p. 77. DOI:10.3390/drones5030077
- [7] Dmitriev E.V., Sokolov A.A., Kozoderov V.V., Delbarre H., Melnik P.G., Donskoi S.A. Spectral-texture classification of high resolution satellite images for the state forest inventory in Russia // Proc. SPIE 11149, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology, t. XXI, 2019, v. 111491J. DOI: 10.1117/12.2532965
- [8] Куминова А.В., Зверева Г.А., Маскаев Ю.М. Растительный покров Хакасии. Новосибирск: Наука, 1976. 423 с.
- [9] Полевая геоботаника / под ред. Е.М. Лавренко, А.А. Корчагина. Т. 3–5. М.; Л.: Наука, 1959–1964. 530 с.; 1972. 336 с.; 1976. 320 с.
- [10] Ярошенко П.Д. Геоботаника. М.: Просвещение, 1969. 199 с.
- [11] Воронов А.Г. Геоботаника. М.: Высшая школа, 1973. 384 с.
- [12] AppEARS Team. Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples (AppEARS). Ver. 3.2.1. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active

- Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota, USA. 2022. <https://appears.earthdatacloud.nasa.gov> (accessed 07.05.2022)
- [13] Running S., Zhao M. MODIS/Terra Gross Primary Productivity Gap-Filled 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A2HGF.061>. 2021. (accessed 07.05.2022).
- [14] Running S., Mu Q., Zhao M., Moreno A. MODIS/Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2021. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2GF.061> (дата обращения 07.05.2022).
- [15] Myneni R., Knyazikhin Y., Park T. MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2021. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD15A2H.061> (дата обращения 07.05.2022).
- [16] Александров Ф.И., Голяндина Н.Э. Выбор параметров при автоматическом выделении трендовых и периодических составляющих временного ряда в рамках подхода «Гусеница»-SSA // Тр. IV Междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO '05. Москва, 25–28 января 2005 г. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. М.: Изд-во Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2005. С. 1849–1864.
- [17] Шевырнов А.П., Чернецкий М.Ю., Высоцкая Г.С. Многолетние тренды NDVI и температуры на юге Красноярского края // Исследование Земли из космоса, 2012. № 6. С. 77–87.
- [18] Кашкин В.Б., Романов А.А., Рублева Т.В. Исследование трендов спутниковых оценок общего содержания озона с использованием сингулярного спектрального анализа // Исследование Земли из космоса, 2009. № 4. С. 9–16.
- [19] Манаков Ю.А., Стрельникова Т.О., Куприянов А.Н. Формирование растительного покрова в техногенных ландшафтах Кузбасса. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. 168 с.
- [20] Лавриненко А.Т., Остапова Н.А., Сафронова О.С., Азев В.А., Евсеева И.Н., Моршнева Е.А. Экологическое состояние почвенно-растительного покрова и атмосферного воздуха в санитарно-защитной зоне разреза «Черногорский» ООО «СУЭК-Хакасия» // Уголь, 2020. № 8. С. 92–95.
- [21] Сафронова О.С., Ламанова Т.Г., Шеремет Н.В. Результаты исследования естественного восстановления растительного покрова на вскрышных отвалах, возникших в 1990-е годы в Республике Хакасия // Уголь, 2018. № 7. С. 68–71. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-7-68-71
- [22] Доронькин В.М., Сафронова О.С., Ламанова Т.Г., Шеремет Н.В. Результаты исследования естественного восстановления растительного покрова на вскрышных отвалах, возникших в 2000-е годы в Республике Хакасия // Уголь, 2019. № 11. С. 94–98.
- [23] Копытов А.И., Куприянов О.А., Манаков Ю.А., Куприянов А.Н. Добыча угля в Кузбассе и новые экотехнологии // ЭКО, 2021. № 6 (564). С. 67–76.
- [24] Копытов А.И., Куприянов А.Н. Новая стратегия развития угольной отрасли Кузбасса и решение экологических проблем // Уголь, 2019. № 11 (1124). С. 89–93.
- [25] Куприянов А.Н., Куприянов О.А., Манаков Ю.А., Шатилов Д.А. Изменение продуктивности отвалов угольных предприятий Кузбасса при реконструкции растительного покрова // Международный научно-исследовательский журнал, 2022. № 9 (123). DOI: 10.23670/IRJ.2022.123.33
- [26] Cai L., Kreft H., Taylor A., Denelle P., Schrader J., Essl F., van Kleunen M., Pergl J., Pyšek P., Stein A., Winter M., Barcelona J.F., Fuentes N., Inderjit, Karger D.N., Kartesz J., Kuprijanov A., Nishino M., Nickrent D., Nowak A., Patzelt A., Pelsler P.B., Singh P., Wieringa J.J., Weigelt P. Global models and predictions of plant diversity based on advanced machine learning techniques // New Phytol, 2023, v. 237, pp. 1432–1445. <https://doi.org/10.1111/nph.18533>
- [27] Уфимцев В.И., Куприянов А.Н. Карбоновые фермы — отвалы угольных предприятий Кузбасса // Уголь, 2021. № 11(1148). С. 56–60.
- [28] Liu Y., Jiang T., Zou C., Zhang H. Influence of the cellulose, hemicellulose and lignin on the combustion behavior of biomass // Clean Coal Technology, 2022, no. 04, pp. 137–143.
- [29] Мурзакматов Р.Т., Шишкин А.С., Борисов А.Н. Особенности формирования насаждений на отвалах угольных разрезов в лесостепной зоне // Сибирский лесной журнал, 2018. № 1. С. 37–49.
- [30] Fox J.F., Campbell J.E., Acton P.M. Carbon sequestration by reforestation legacy grasslands on coal mining sites // Energies, 2020, v. 13, pp. 6340. doi.org/10.3390/en13236340
- [31] Han J., Hu Z., Mao Z., Li G., Liu S., Yuan D., Guo J. How to Account for Changes in Carbon Storage from Coal Mining and Reclamation in Eastern China? Taking Yanzhou Coalfield as an Example to Simulate and Estimate // Remote Sens, 2022, v. 14, p. 2014. doi.org/10.3390/rs14092014
- [32] Xin L., Ke Y., Juejing F. Utilization of resources in abandoned coal mines for carbon neutrality // Science of The Total Environment, 2022, v. 822, p. 153646. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153646
- [33] Singh R.S., Singh A.K., Tripathi N., Tiwari B.K. Carbon sequestration in Revegetated coal mine wastelands // Coal S&T Project Report, Ministry of Coal, Government of India, 2011, EE/40 GAP/04/EMG/MOC/2008-2009, pp. 174–184.

Сведения об авторах

Жуков Александр Андреевич  — аспирант, инженер, ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет имени Н.Ф. Катанова», zhukov_aa@mail.ru

Жукова Елена Юрьевна — канд. биол. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет имени Н.Ф. Катанова», biosara@mail.ru

Поступила в редакцию 07.11.2022.

Одобрено после рецензирования 10.01.2023.

Принята к публикации 27.01.2023.

RESTORED VEGETATION PRODUCTIVITY DYNAMICS AT SURFACE COAL MINE «CHERNOGORSKY» BY SATELLITE DATA TERRA/MODIS

A.A. Zhukov✉, E.Y. Zhukova

Katanov State University, 90, Lenin av., 655017, Abakan, Republic of Khakassia, Russia

zhukov_aa@mail.ru

The main patterns of long-term and seasonal dynamics of productivity, leaf area index and evapotranspiration of plant communities on recultivated dumps of the open surface coal mine «Chernogorsky» in the period from 2001 to 2021 according to Terra/MODIS satellite data were revealed. A positive trend in the development of vegetation on the dumps was revealed. Productivity and leaf area index of phytocenoses correlate. Terra/MODIS data underestimate the real phytomass.

Keywords: productivity, spectral indices, vegetation dynamics, Terra/MODIS, open surface coal mine «Chernogorsky»

Suggested citation: Zhukov A.A., Zhukova E.Yu. *Dinamika produktivnosti vosstanovlennoy rastitel'nosti ugol'nogo razreza «Chernogorskiy» po sputnikovym dannym Terra/MODIS* [Restored vegetation productivity dynamics at surface coal mine «Chernogorsky» by satellite data Terra/MODIS]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 2, pp. 96–103. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-2-96-103

References

- [1] Huang L., Zhang P., Hu Y., Zhao Y. Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mines. *Ecological Engineering*, 2016, v. 94, pp. 638–646. DOI:10.1016/j.ecoleng.2016.06.108
- [2] Li X., Lei S., Liu F., Wang W. Analysis of Plant and Soil Restoration Process and Degree of Refuse Dumps in Open-Pit Coal Mining Areas. *International J. of Environmental Research and Public Health*, 2020, v. 17(6), p. 1975. DOI:10.3390/ijerph17061975
- [3] Yanjun G., Juan W., Wei Z., Zhongke B., Yingui C. Identification of land reclamation stages based on succession characteristics of rehabilitated vegetation in the Pingshuo opencast coal mine. *J. of Environmental Management*, 2022, v. 305, pp. 114–352. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.114352
- [4] Alday J.G., Marrs R.H., Martínez-Ruiz C. Vegetation succession on reclaimed coal wastes in Spain: the influence of soil and environmental factors. *Applied Vegetation Science*, 2011, v. 14, pp. 84–94. DOI: 10.1111/j.1654-109X.2010.01104.x
- [5] Zen'kov I.V., Yuronen Yu.P., Karacheva G.A., Stukova O.O., Kiryushina E.V., Mironova Zh.V., Veretenova T.A. *Ispol'zovanie rezul'tatov distantsionnogo zondirovaniya v otsenke vosstanovleniya ekosistemy na territoriyakh s otkrytoy ugledobychey v regionakh Urala* [Application of remote sensing results in assessment of ecosystem restoration in open coal mining areas in the Urals regions]. *Ugol'* [Coal], 2020, no. 10, pp. 68–71. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-10-68-71
- [6] Safonova A., Hamad Y., Dmitriev E., Georgiev G., Trenkin V., Georgieva M., Dimitrov S., Iliev M. Individual Tree Crown Delineation for the Species Classification and Assessment of Vital Status of Forest Stands from UAV Images. *Drones*, 2021, no. 5, p. 77. DOI:10.3390/drones5030077
- [7] Dmitriev E.V., Sokolov A.A., Kozoderov V.V., Delbarre H., Mel'nik P.G., Donskoi S.A. Spectral-texture classification of high resolution satellite images for the state forest inventory in Russia. *Proc. SPIE 11149, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology*, t. XXI, 2019, v. 111491J. DOI: 10.1117/12.2532965
- [8] Kuminova A.V., Zvereva G.A., Maskaev Yu.M. *Rastitel'nyy pokrov Khakassii* [Vegetation cover of Khakassia]. Novosibirsk: Nauka, 1976, 423 p.
- [9] *Polevaya geobotanika* [Field geobotany]. T. 3–5. Eds. E.M. Lavrenko, A.A. Korchagin. Moscow-Leningrad: Nauka, 1959–1964, 530 p.; 1972, 336 p.; 1976, 320 p.
- [10] Yaroshenko P.D. *Geobotanika* [Geobotany]. Moscow: Enlightenment, 1969, 199 p.
- [11] Voronov A.G. *Geobotanika* [Geobotany]. Moscow: Higher School, 1973, 384 p.
- [12] AppEARS Team. Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples (AppEARS). Ver. 3.2.1. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota, USA. 2022. <https://appears.earthdatacloud.nasa.gov> (accessed 07.05.2022)
- [13] Running S., Zhao M. MODIS/Terra Gross Primary Productivity Gap-Filled 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2021. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A2HGF.061> (accessed 07.05.2022)
- [14] Running S., Mu Q., Zhao M., Moreno A. MODIS/Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2021. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2GF.061> (accessed 07.05.2022)
- [15] Myneni R., Knyazikhin Y., Park T. (2021). MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD15A2H.061> (accessed 07.05.2022)
- [16] Aleksandrov F.I., Golyandina N.E. *Vybor parametrov pri avtomaticheskoy vydelenii trendovykh i periodicheskikh sostavlyayushchikh vremennogo ryada v ramkakh podkhoda «Gusenitsa»-SSA* [The choice of parameters for the automatic selection of trend and periodic components of a time series within the framework of the Caterpillar-SSA approach]. *Trudy IV mezhdunarodnoy konferentsii «Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya» SICPRO '05* [Collection of scientific papers of the IV International Conference «Identification of systems and control tasks» SICPRO'05]. Moscow, 25–28 January 2005. Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN. Moscow: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2005, pp. 1849–1864.
- [17] Shevyrnogov A.P., Chernetskii M.Yu., Vysotskaya G.S. *Mnogoletnie trendy NDVI i temperatury na Yuge Krasnoyarskogo Kraya* [Interannual Trend of NDVI and Temperature in the South of Krasnoyarsky Krai]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth Observation and Remote Sensing], 2012, no. 6, pp. 77–87.
- [18] Kashkin V.B., Romanov A.A., Rubleva T.V. *Issledovanie trendov sputnikovyykh otsenok obshchego sodержaniya ozona s ispol'zovaniem singulyarnogo spektral'nogo analiza* [Total Ozone Trends Research Using Singular Spectrum Analysis]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth Observation and Remote Sensing], 2009, no. 4, pp. 9–16.

- [19] Manakov Yu.A., Strel'nikova T.O., Kupriyanov A.N. *Formirovanie rastitel'nogo pokrova v tekhnogennykh landshaftakh Kuzbassa* [Formation of vegetation cover in technogenic landscapes of Kuzbass]. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2011, 168 p.
- [20] Lavrinenko A.T., Ostapova N.A., Safronova O.S., Azev V.A., Evseeva I.N., Morshnev E.A. *Ekologicheskoe sostoyanie pochvenno-rastitel'nogo pokrova i atmosfernogo vozdukh v sanitarno-zashchitnoy zone razreza «Chernogorskiy» OOO «SUEK-Khakasiya»* [The ecological condition of land cover and atmospheric air in the sanitary-protective zone of the coal mining enterprise «Chernogorskiy» open-pit mine «Suek-Khakassia» LLC]. *Coal*, 2020, no. 8, pp. 92–95.
- [21] Safronova O.S., Lamanova T.G., Sheremet N.V. *Rezultaty issledovaniya estestvennogo vosstanovleniya rastitel'nogo pokrova na vskryshnykh otvalakh, vznikshikh v 1990-e gody v Respublike Khakasiya* [The results of the study of natural regeneration of vegetation cover on overburden dumps in the republic of Khakassia, which emerged in the 90-years of the twentieth century]. *Coal*, 2018, no. 7, pp. 68–71.
- [22] Doron'kin V.M., Safronova O.S., Lamanova T.G., Sheremet N.V. *Rezultaty issledovaniya estestvennogo vosstanovleniya rastitel'nogo pokrova na vskryshnykh otvalakh, vznikshikh v 2000-e gody v Respublike Khakasiya* [The results of the study of natural revegetation on overburden piles, resulting in 2000 years in the Republic of Khakassia]. *Coal*, 2019, no. 11, pp. 94–98.
- [23] Kopytov A.I., Kupriyanov O.A., Manakov Yu.A., Kupriyanov A.N. *Dobycha uglja v Kuzbasse i novye ekotekhnologii* [Coal mining in Kuzbass and new ecotechnologies]. *Eco*, 2021, no. 6 (564), pp. 67–76.
- [24] Kopytov A.I., Kupriyanov A.N. *Novaya strategiya razvitiya ugol'noy otrasli Kuzbassa i reshenie ekologicheskikh problem* [A new strategy for the development of the coal industry of Kuzbass and solving environmental problems]. *Coal*, 2019, no. 11 (1124), pp. 89–93. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-11-89-93
- [25] Kupriyanov A.N., Kupriyanov O.A., Manakov Yu.A., Shatilov D.A. *Izmenenie produktivnosti otvalov ugol'nykh predpriyatiy Kuzbassa pri rekonstruktsii rastitel'nogo pokrova* [Changes in the productivity of dumps of Kuzbass coal enterprises during the reconstruction of vegetation cover]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2022, no. 9 (123). DOI: 10.23670/IRJ.2022.123.33
- [26] Cai L., Kreft H., Taylor A., Denelle P., Schrader J., Essl F., van Kleunen M., Pergl J., Pyšek P., Stein A., Winter M., Barcelona J.F., Fuentes N., Inderjit, Karger D.N., Kartesz J., Kupriyanov A., Nishino M., Nickrent D., Nowak A., Patzelt A., Pelsler P.B., Singh P., Wieringa J.J., Weigelt P. Global models and predictions of plant diversity based on advanced machine learning techniques. *New Phytol*, 2023, v. 237, pp. 1432–1445. <https://doi.org/10.1111/nph.18533>
- [27] Ufimtsev V.I., Kupriyanov A.N. *Karbonovye fermi — otvaly ugol'nykh predpriyatiy Kuzbassa* [Carbon farms-dumps of coal enterprises of Kuzbass]. *Coal*, 2021, no. 11(1148), pp. 56–60.
- [28] Liu Y., Jiang T., Zou C., Zhang H. Influence of the cellulose, hemicellulose and lignin on the combustion behavior of biomass. *Clean Coal Technology*, 2022, v. 04, pp. 137–143.
- [29] Murzakmatov R.T., Shishikin A.S., Borisov A.N. *Osobennosti formirovaniya nasazhdeniy na otvalakh ugol'nykh razrezov v lesostepnoy zone* [Features of the formation of plantings on the dumps of coal mines in the forest-steppe zone]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forest Journal], 2018, no. 1, pp. 37–49.
- [30] Fox J.F., Campbell J.E., Acton P.M. Carbon sequestration by reforesting legacy grasslands on coal mining sites. *Energies*, 2020, v. 13, pp. 6340. doi.org/10.3390/en13236340
- [31] Han J., Hu Z., Mao Z., Li G., Liu S., Yuan D., Guo J. How to Account for Changes in Carbon Storage from Coal Mining and Reclamation in Eastern China? Taking Yanzhou Coalfield as an Example to Simulate and Estimate. *Remote Sens*, 2022, v. 14, p. 2014. doi.org/10.3390/rs14092014
- [32] Xin L., Ke Y., Juejing F. Utilization of resources in abandoned coal mines for carbon neutrality. *Science of The Total Environment*, 2022, v. 822, p. 153646. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153646
- [33] Singh R.S., Singh A.K., Tripathi N., Tiwari B.K. Carbon sequestration in Revegetated coal mine wastelands. *Coal S&T Project Report*, Ministry of Coal, Government of India, 2011, EE/40 GAP/04/EMG/MOC/2008-2009, pp. 174–184.

Acknowledgments

The research was carried out at the expense of a grant from the Ministry of Education and Science of the Republic of Khakassia (Agreement No. 94 dated 13.12.2022). The research project «Assessment of carbon sequestration by vegetation of technogenically disturbed territories of the Republic of Khakassia», as a part of the Program of the World-class scientific and educational center «Yenisei Siberia» «Regional network of carbon polygons for long-term observations greenhouse gas flows, heat and moisture». We express our gratitude to the scientific supervisor, professor, Dr. Sci. (Biology), Director of the Kuzbass Botanical Garden A.N. Kupriyanov, Cand. Sci. (Biology) O.A. Kupriyanov and the staff of the Reclamation laboratory of the Institute of Coal and Coal Chemistry SB RAS (Kemerovo) for their assistance in conducting research. We also thank for the assistance in organizing the research of SUEK-Khakassia and personally the chief ecologist E.V. Markova and the research engineer of the Laboratory of Land Reclamation of Research Institute of Agricultural Problems of Khakassia E.A. Morshnev.

Authors' information

Zhukov Aleksandr Andreevich — pg., Engineer, Katanov Khakass State University, zhukov_aa@mail.ru

Zhukova Elena Yurievna — Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Katanov Khakass State University, biosara@mail.ru

Received 07.11.2022.

Approved after review 10.01.2023.

Accepted for publication 27.01.2023.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest