

А. О. Полетаев¹

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ДОЛИННО-РЕЧНЫХ ЛАНДШАФТОВ

АННОТАЦИЯ

В данной статье описываются возможности использования вегетационного индекса *Chlorophyll vegetation index* (CVI) для детектирования растительности пойменных участков рек, обладающей значительным потенциалом для секвестрации и длительного связывания углерода (диоксида углерода). Растры индекса CVI рассчитаны на основе спутниковых снимков Landsat-8–9 OLI/TIRS C2 L2, полученных в течение вегетационного периода в 2020–2023 гг. (апрель–август). На основании набора растровых данных индекса CVI рассчитаны растры разности между растрами индекса CVI и выявлены ареалы увеличения и уменьшения индекса CVI на ключевой территории, расположенной в долинах рр. Северский Донец и Нежеголь (бассейн р. Дон). Совмещение ландшафтной карты и растра разности между растрами CVI позволило выявить ареалы болотнотравно-осоковых лугов, на которых с начала мая к началу июля 2022 г. снизилось содержание хлорофилла. Анализ соотношения площадей величин растров разности между растрами CVI показал (согласно данным для вегетационных периодов 2020–2023 гг.), что величина, равная 1, находится в пределах 1,6–53,6 % от площади всей ключевой территории и приходится на болотнотравно-осоковые луга, злаково-разнотравные луга, осоково-камышовые заболоченные луга и болота, пойменные леса с преобладанием ивы и черной ольхи. Величина, равная 0, находится в пределах 46,4–98,3 % от всей площади и приходится на болотнотравно-осоковые луга, злаково-разнотравные луга, сосновые насаждения, осоково-камышовые заболоченные луга и болота, пойменные леса с преобладанием ивы и черной ольхи. Величина, равная –1, находится в пределах 0–17,6 % от всей площади и приходится на болотнотравно-осоковые луга, злаково-разнотравные луга, осоково-камышовые заболоченные луга и болота. Для территорий, на которых усредненное значение индекса CVI менее или равно 1, преобладающим типом растительности являются сосновые насаждения. Для территорий, где усредненное значение индекса CVI в пределах 1,1–1,5, преобладает луговая растительность. На территориях, где усредненное значение индекса CVI составляет более 1,5, наибольшую площадь занимают пойменные леса с преобладанием ивы и черной ольхи. Совместное использование данных, полученных в ходе ландшафтных исследований, и результатов анализа изменения вегетационных индексов позволяет получить новую информацию для принятия решений по рациональной организации природопользования в пределах долинно-речных ландшафтов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вегетационный индекс, вегетационный индекс хлорофилла, речная долина, пойменные ландшафты, бассейн р. Дон

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Институт наук о Земле, ул. Победы, д. 85, Белгород, Россия, 308015, e-mail: poletaev@bsu.edu.ru

Arseniy O. Poletaev¹

FEATURES OF SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF PHOTOSYNTHETIC ACTIVITY OF VEGETATION IN VALLEY-RIVER LANDSCAPES

ABSTRACT

The article describes the possibilities of using the Chlorophyll vegetation index (CVI) to detect vegetation in floodplain areas of rivers, which have significant potential for sequestration and long-term sequestration of carbon (carbon dioxide). CVI index rasters are calculated based on Landsat-8–9 OLI/TIRS C2 L2 satellite images obtained during the vegetative season in 2020–2023 (April–August). Based on a set of raster data of the CVI index, rasters of the difference between rasters of the CVI index were calculated and areas of increase and decrease in the CVI index were identified in the key area located in the valleys of the Seversky Donets and the Nezhegol rivers (Don River basin). Combining the landscape map and the raster of the difference between the CVI rasters made it possible to identify areas of marsh-grass-sedge meadows, where the chlorophyll content decreased from the beginning of May to the beginning of July 2022. An analysis of the ratio of the areas of the difference raster values between the CVI rasters showed (according to data for the growing seasons 2020–2023) that a value equal to 1 is in the range of 1.6–53.6 % of the area of the entire key territory and falls on the marsh-grass-sedge meadows, grass-forb meadows, sedge-reed marshy meadows and swamps, floodplain forests with domination of willow and black alder. A value equal to 0 is in the range of 46.4–98.3 % of the total area and falls on marsh-grass-sedge meadows, grass-forb meadows, pine plantations, sedge-reed marshy meadows and swamps, floodplain forests with domination of willow and black alder. The value equal to –1 is in the range of 0–17.6 % of the entire area and falls on marsh-grass-sedge meadows, grass-forb meadows, sedge-reed marshy meadows and swamps. For territories where the average value of the CVI index is less than or equal to 1, the predominant type of vegetation is pine plantations. For territories where the average value of the CVI index is within 1.1–1.5, meadow vegetation predominates. In areas where the average value of the CVI index is more than 1.5, the largest area is occupied by floodplain forests with domination of willow and black alder. The joint use of data obtained during landscape research and the results of analysis of changes in vegetation indices allows us to obtain new information for making decisions on the rational organization of environmental management within valley-river landscapes.

KEYWORDS: vegetation index, chlorophyll vegetation index, river valley, floodplain landscapes, Don River basin

ВВЕДЕНИЕ

Вегетационные индексы являются количественными показателями состояния растительности. На данный момент разработано более 500 различных вегетационных индексов, полный перечень которых представлен на ресурсе *Index DataBase*² с указанием формул для их расчета. Достаточно широко они применяются в сельском хозяйстве, позволяя выявлять особенности растительного покрова как пахотных, так и залежных земель [Терехин, 2021]. Вегетационные индексы позволяют анализировать изменения растительности, вызванные климатическими условиями, а также засухой, пожарами и другими факторами [Рыгалова, Плуталова, 2021; Высоцкая, Медведков, 2022; Avetisyan et al., 2023; Zhu et al., 2024]. Таким

¹ Belgorod National Research University, Institute of Earth Sciences, 85, Pobedy str., Belgorod, 308015, Russia, e-mail: poletaev@bsu.edu.ru

² Index DataBase. Электронный ресурс: <https://www.indexdatabase.de/db/i.php?offset=1> (дата обращения 01.04.2024)

образом обеспечивается мониторинг физиологического состояния растений, детектирование ареалов с недостатком или переизбытком увлажнения.

Вегетационные индексы позволяют детектировать участки растительности, обладающие высокими запасами хлорофилла и высокой фотосинтетической активностью, либо, наоборот, с дефицитом хлорофилла и низкой фотосинтетической активностью, в поймах равнинных рек, где присутствуют леса, луга, болота — различные типы растительных сообществ, которые обладают определенными запасами хлорофилла в растительной массе. Исследование растительности речных пойм, их динамики в течение вегетационного периода [Курганович, Голятина, 2015] позволяет детально оценить динамику водного баланса территории, а с помощью спектральных индексов, чувствительных к растительности и к водной компоненте, могут быть определены границы территорий, подверженных затоплению [Chandrasekar et al., 2010], что может представлять интерес при определении границ зон затопления [Поletaев, 2023; Lisetskii et al., 2022;] и выделении экотонных систем типа «вода–суша» [Кутузов, 2011]. Кроме этого, вегетационные индексы позволяют количественно оценивать величину и продолжительность реакции пойменной растительности на наводнение [Sims, Colloff, 2012]. Важное значение имеют аэрофотоснимки, полученные с помощью БПЛА [Домнина и др., 2017; Van Iersel et al., 2018], а также информация с компактного бортового спектрографического сканера (CASI) и лидара (LiDAR) [Geerling et al., 2007], т. к. их использование позволяет проводить высокоточную классификацию типов растительности речных пойм и создавать детальные карты. Использование вегетационных индексов также имеет потенциал при изучении загрязнения тяжелыми металлами пойменных почв, т. к. выявляется взаимосвязь между отражательной способностью растительности и загрязнением почвы тяжелыми металлами, зависящая от вида растений [Kooistra et al., 2004].

Согласно программе «Развитие водного и лесного хозяйства Белгородской области», рассчитанной на 2022–2025 гг., осуществляется масштабная работа по расчистке водных объектов, включая русла рек. При этом проводится изъятие жесткой водной растительности с их корневой системой в составе донных отложений, что сопровождается неизбежными нарушениями почвенно-растительного покрова в прибрежных защитных полосах. В то же время современные подходы к эколого-ландшафтному обустройству земель, прилегающих к гидрографической сети, предполагают не только лесомелиоративное закрепление прибрежных полос и водоохраных зон [Marinina et al., 2016], но и решение новых задач, связанных с культивированием быстрорастущих древесных пород для секвестрации и длительного связывания диоксида углерода.

В настоящее время при реализации стратегии низкоуглеродного развития особенный интерес представляет изучение динамики изменения вегетационных индексов наряду с полевыми геоботаническими и ландшафтными описаниями [Poletaev, Lisetskii, 2024] с целью выявления вклада в депонирование углерода отдельных ландшафтных выделов, расположенных в пойменных участках рек.

Цель данного исследования заключалась в изучении потенциала растительности пойменных участков долинно-речных ландшафтов для секвестрации и длительного связывания диоксида углерода.

Район исследования

Территория района исследований расположена в Шебекинском районе, где экспликация ландшафтов следующая (доля площади в % от площади района) [Юдина, 2013]:

- водная поверхность — 1,24;
- территория без водной поверхности — 98,76;
 - а) плакорный тип местности — 24,48;

- b) склоновый тип местности — 46,71;
- c) надпойменно-террасовый тип местности — 15,54;
- d) пойменный тип местности — 12,03.

Для плакорного типа местности типичны выпуклые поверхности с уклонами до 3°; характерными урочищами являются плакорные дубравы на серых лесных почвах, покрывающие водоразделы в бассейне р. Нежеголь. Широко распространен надпойменно-террасовый тип местности, а ширина террас Северского Донца между Нижней Таволжанкой и Белгородом составляет 5–6 км. Сосновые насаждения — наиболее распространенные урочища первой надпойменной террасы. Пойменный тип местности достаточно хорошо развит в долине Северского Донца и характеризуется наличием низинных болот, поросших осоками, озерным камышом, узколиственным рогозом. Наиболее развит приречный тип местности, где преобладающий тип урочищ — балки со склоновыми и донными оврагами, байрачными дубравами, обнаженными меловыми склонами, где иногда сохранились уникальные меловые боры.

Ключевая территория (рис. 1), общая площадь которой составляет около 233 га, большей частью расположена в долине р. Северский Донец, где в 97 км от его истока находится устье его притока р. Нежеголь (длина 75 км) (северная часть ключевой территории). Территория входит в состав Осколо-Донецкого физико-географического района подзоны типичной лесостепи (600 мм осадков в год, среднегодовая температура 7,7 °С).

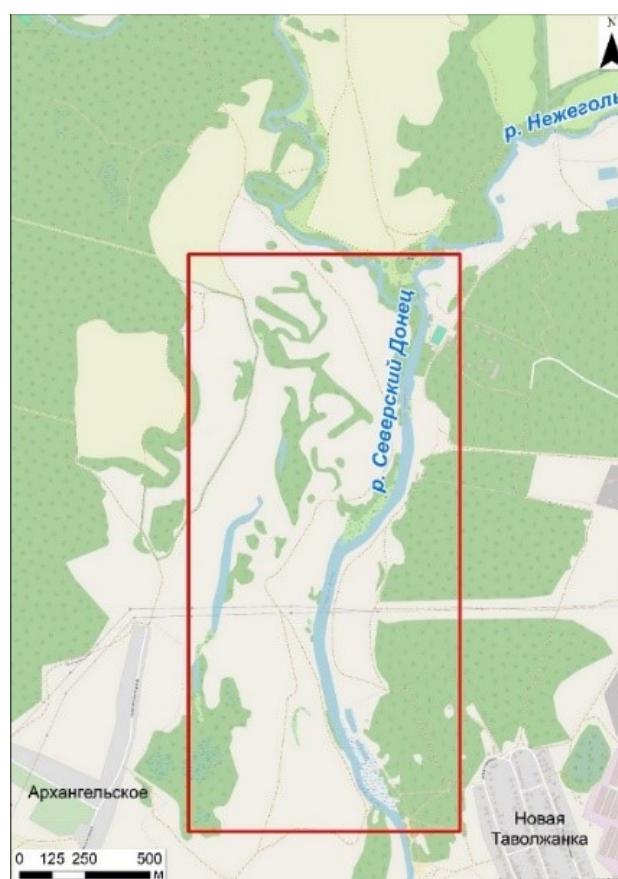


Рис. 1. Карта-схема границ ключевой территории
(координаты: 50°22'10.58" с.ш., 36°48'8.15" в.д.)
Fig. 1. Schematic map of the boundaries of the key territory
(coordinates: 50°22'10.58" N, 36°48'8.15" E)

Ландшафты ключевой территории являются природно-антропогенными, т. к. наряду с особо охраняемыми категориями земель и зонами с особыми условиями использования территорий на ключевой территории представлены зоны рекреационного назначения и сельскохозяйственные зоны. Это показано на карте градостроительного зонирования Шебекинского городского округа¹. В целом, ключевая территория расположена в зоне умеренной антропогенной нагрузки, согласно карте распределения антропогенной нагрузки на территории Белгородской области². Учитывая это, природно-антропогенные ландшафты, расположенные в пределах ключевой территории, относятся к группе вторично-производных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данном исследовании для изучения динамики фотосинтетической активности растительности в течение вегетационного периода в поймах рр. Северский Донец и Нежеголь был использован вегетационный индекс хлорофилла CVI (*chlorophyll vegetation index*), рассчитанный на основе спутниковых снимков Landsat-8–9 OLI/TIRS C2 L2. Для расчета индекса CVI на основе спутниковых снимков Landsat-8–9 используются следующие спектральные каналы: Band 3 Green (0.53–0.59 μm) 30 m, Band 4 Red (0.64–0.67 μm) 30 m, Band 5 Near-Infrared (0.85–0.88 μm) 30 m. Индекс CVI [Hunt et al., 2011; Vincini et al., 2016] используется в качестве средства оценки хлорофилла листа в масштабе кроны для всех классов наклона листа рассчитывается по формуле (1) для Landsat-8–9:

$$CVI = \text{Band5} \cdot \frac{\text{Band4}}{\text{Band3}^2} \quad (1)$$

Индекс CVI был рассчитан по спутниковым снимкам Landsat-8–9, полученным в течение вегетационного периода в 2020–2023 гг. (апрель–август). Полученный набор растровых данных индекса CVI послужил основанием для расчета растров разности, позволяющих выявлять ареалы увеличения и уменьшения индекса CVI на ключевой территории. На основании растров индекса CVI были также получены растры усредненных значений индекса CVI, которые стали основой для детального анализа с использованием ландшафтной карты м-ба 1: 10 000, составленной автором [Полемаев, 2023]. Для создания ландшафтной карты были использованы:

- государственная геологическая карта Российской Федерации м-ба 1: 200 000. Издание второе. Воронежская серия. Карта четвертичных образований М-37-ХІІІ (Белгород)³;
- почвенная карта м-ба 1: 10 000 колхоза «Заря» Шебекинского района Белгородской области, участок №4;
- ресурс Google Earth (космические снимки высокого разрешения), данные полевых наблюдений, данные литературных источников в рамках задачи по определению растительного покрова;
- топографическая карта м-ба 1: 10 000 и современный космический снимок высокого разрешения для определения и уточнения форм рельефа;
- ЦМР пространственного разрешения 30 м для определения крутизны склонов.

¹ Правила землепользования и застройки Шебекинского городского округа. Электронный ресурс: <https://fgistp.economy.gov.ru/lk/#/document-show/344152> (дата обращения 19.08.2024)

² Географический атлас Белгородской области: природа, общество, хозяйство. Распределение антропогенной нагрузки. Электронный ресурс: <https://geoportal.rgo.ru/record/5051> (дата обращения 19.08.2024)

³ М-37-ХІІІ (Белгород). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Издание второе. Серия Воронежская. Карта четвертичных образований. Электронный ресурс: <https://www.geokniga.org/maps/5764> (дата обращения 19.08.2024)

Алгоритм действий по выявлению пространственно-временных особенностей изменения фотосинтетической активности растительного покрова представлен на схеме (рис. 3), ландшафтная карта на ключевую территорию показана на рис. 2.

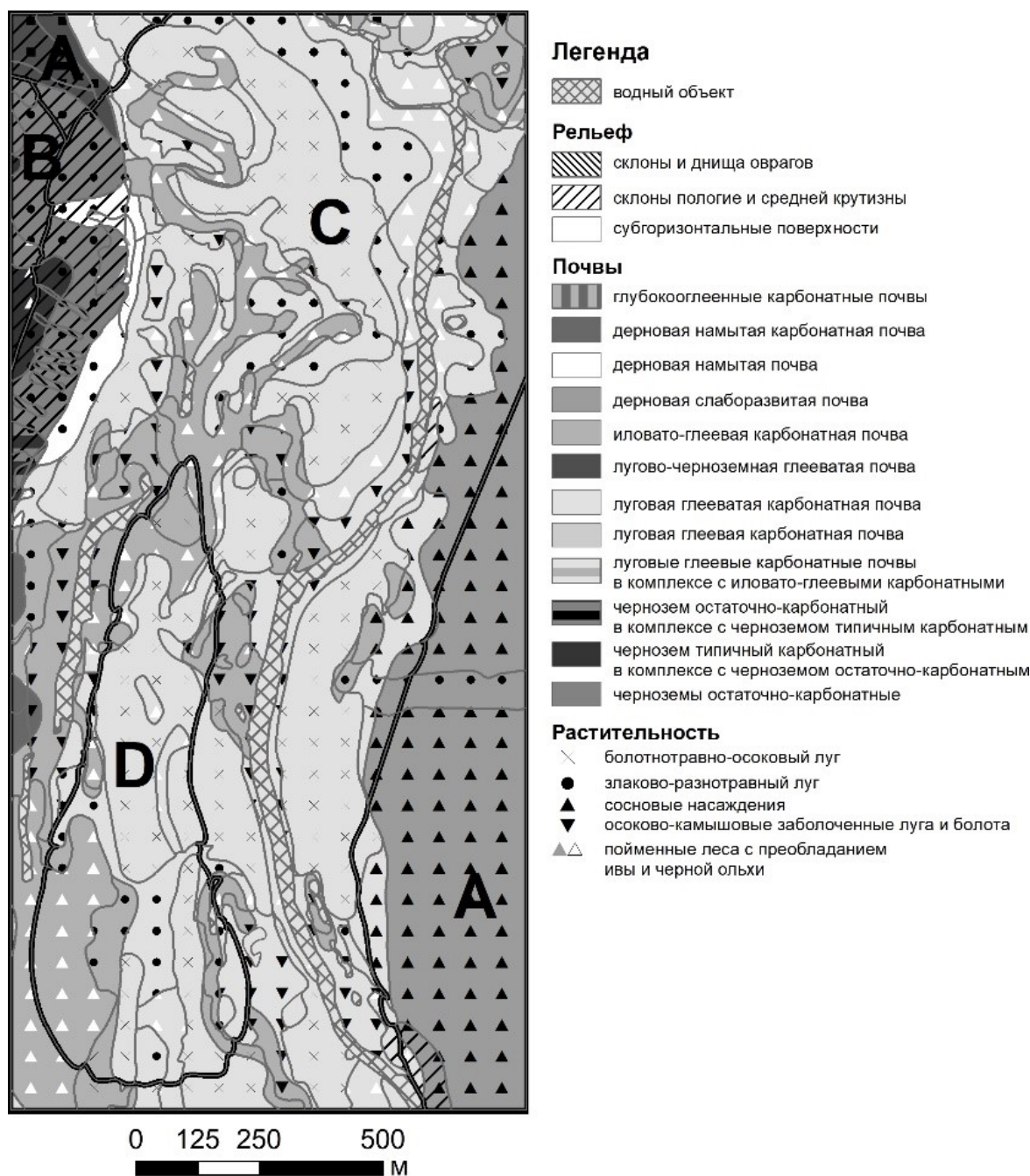


Рис. 2. Ландшафтная карта на ключевую территорию (составлена автором).
Природные комплексы: А — на аллювиальных отложениях первой надпойменной террасы,
В — на дочетвертичных отложениях, представленных мелями белыми, писчими,
С — на аллювиальных отложениях поймы, D — на болотных отложениях

Fig. 2. Landscape map of the key territory (compiled by the author). Natural complexes:
A — on alluvial deposits of the first terrace above the floodplain,
B — on pre-Quaternary deposits, represented by white chalks, writing chalks,
C — on alluvial deposits of the floodplain, D — on swamp deposits

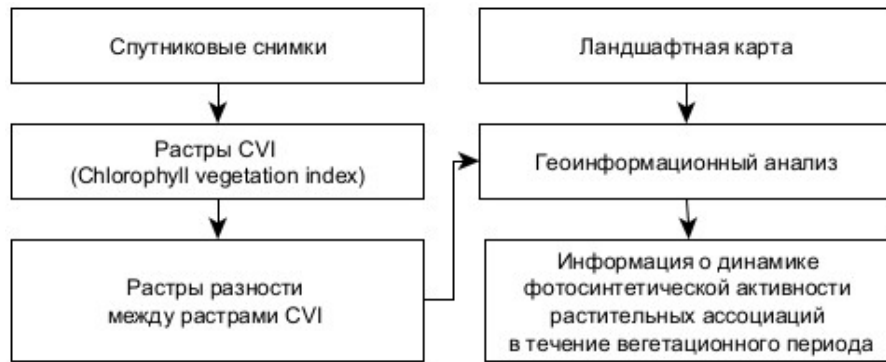


Рис. 3. Схема алгоритма действий по выявлению пространственно-временных особенностей изменения фотосинтетической активности растительного покрова
Fig. 3. Scheme of the algorithm of actions to identify spatiotemporal features of changes in the photosynthetic activity of vegetation

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные для ключевой территории растры индекса CVI и растры, показывающие величину разности между растрами CVI, представлены на рис. 4–7.

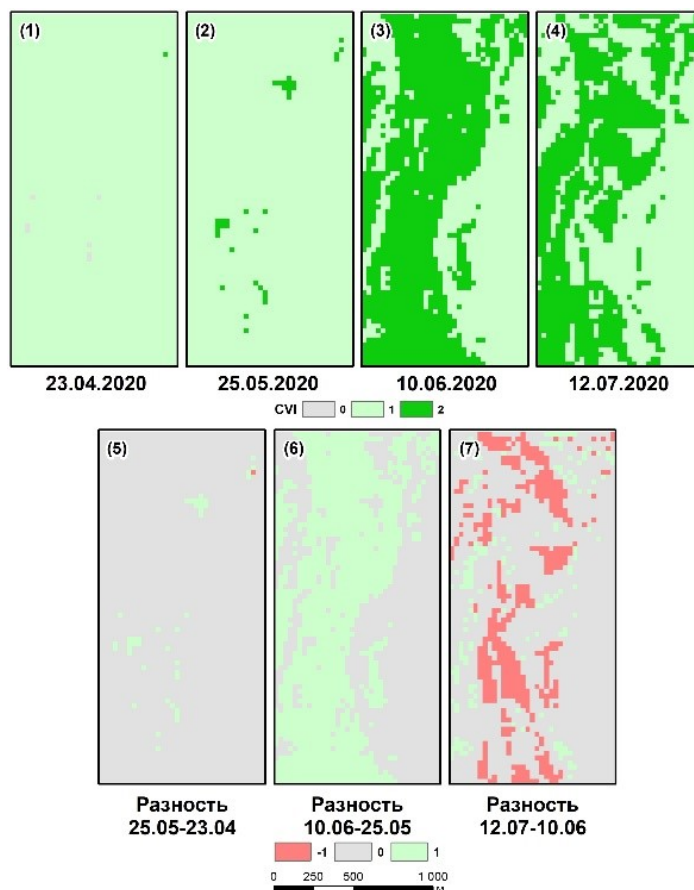
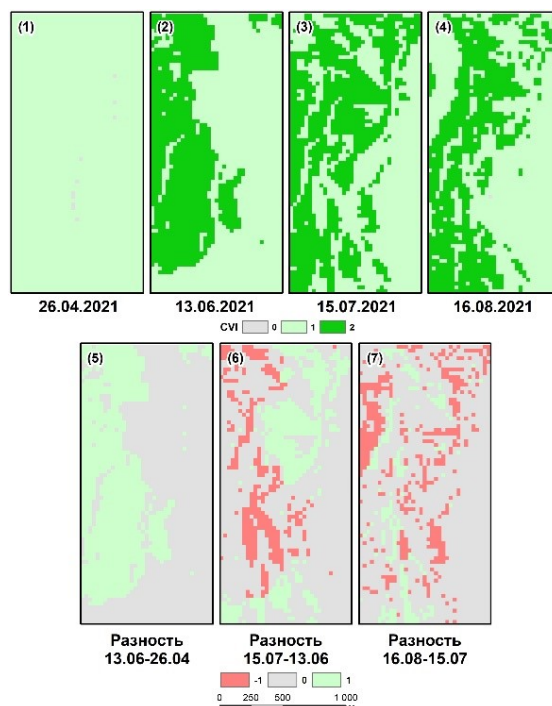
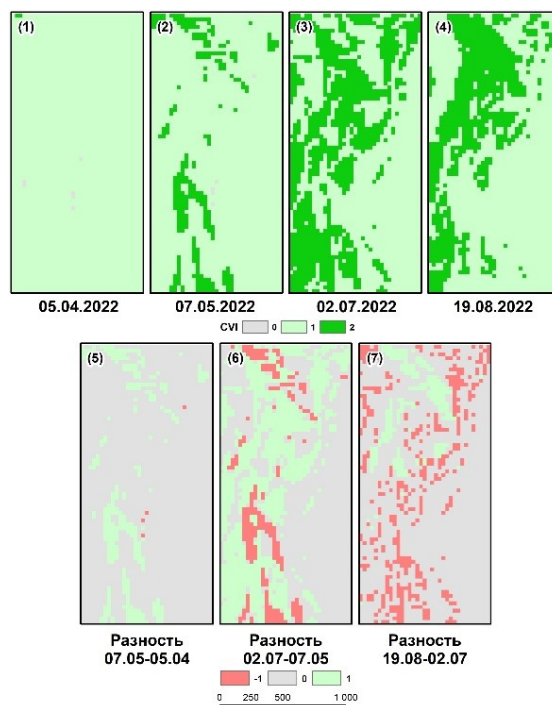


Рис. 4. Изменение индекса CVI за период с 23.04.2020 по 12.07.2020 и величина разности между растрами
Fig. 4. Change in the CVI index for the period from 23.04.2020 to 12.07.2020 and the magnitude of the difference between the rasters



*Рис. 5. Изменение индекса CVI за период с 26.04.2021 по 16.08.2021
и величина разности между растрами*
*Fig. 5. Change in the CVI index for the period from 26.04.2021 to 16.08.2021
and the magnitude of the difference between the rasters*



*Рис. 6. Изменение индекса CVI за период с 05.04.2022 по 19.08.2022
и величина разности между растрами*
*Fig. 6. Change in the CVI index for the period from 05.04.2022 to 19.08.2022
and the magnitude of the difference between the rasters*

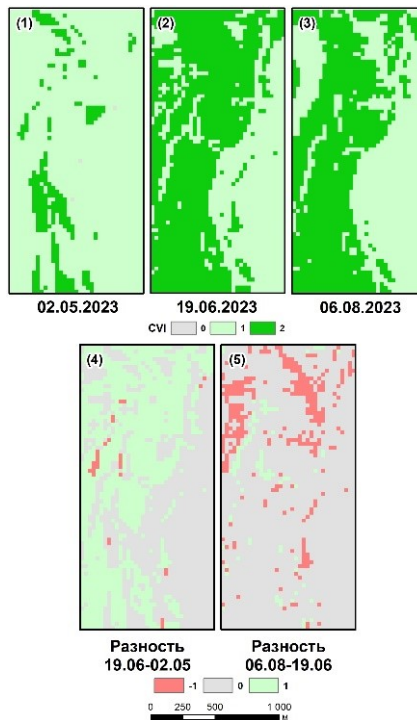


Рис. 7. Изменение индекса CVI за период с 02.05.2023 по 06.08.2023

и величина разности между растрами

*Fig. 7. Change in the CVI index for the period from 02.05.2023 to 06.08.2023
and the magnitude of the difference between the rasters*

Растры разности между растрами CVI необходимы для выявления изменения величины CVI за определенный период для каждой из ячеек растра, что возможно сделать с помощью таких растров, представленных на рис. 4–7 под растрами индекса CVI. Так, например, выявляются схожие по площади и форме ареалы, где наблюдается увеличение или уменьшение хлорофилла на рис. 4(7) (разность 12.07–10.06.2020), рис. 5(6) (разность 15.07–13.06.2021), рис. 6(6) (разность 02.07–07.05.2022) — это связано со схожими периодами вегетации (май–июль). Что касается изменения величины индекса CVI с апреля по май, то рис. 4(5) (разность 25.05–23.04.2020), рис. 6(5) (разность 07.05–05.04.2022) показывают, что для большей части ключевой территории величина индекса CVI остается неизменной.

На рис. 6(5) и рис. 6(6) идентифицируются ареалы, где активный рост содержания хлорофилла с апреля до начала мая 2022 г. сменяется в следующем периоде к началу июля 2022 г. снижением содержания хлорофилла. Растительность данных ареалов в основном представлена болотнотравно-осоковым лугом, что было определено по ландшафтной карте, составленной автором [Полемаев, 2023]. Для этого растр разности 02.07–07.05.2022 (рис. 6(6)) был сконвертирован в векторный формат, и с помощью инструмента «Intersect» ПО ArcGIS 10.5 пересечен с ландшафтной картой (рис. 8). Для выявления этих ареалов необходим растр CVI, отражающий состояние растительности в мае, т. к. для 2021 г. на рис. 5(5) (разность 13.06–26.04.2021) эти ареалы не идентифицируются.

Можно отметить актуальность совместного использования ландшафтной карты с растровыми данными, отражающими состояние растительности, т. к. таким образом, с одной стороны, возможно уточнять границы определенных ПТК на ландшафтной карте и давать их более подробное описание учитывая особенности вегетационного периода, а с другой стороны, растровые данные, отражающие состояние растительности, возможно

будет «разрезать» с учетом границ ландшафтной карты и уже отдельно анализировать динамику состояния растительности определенных ПТК, привлекая более детальные данные, например ЦМР высокого разрешения и аэрофотоснимки (в т. ч. мультиспектральные, полученные в результате аэрофотосъемки с БПЛА).

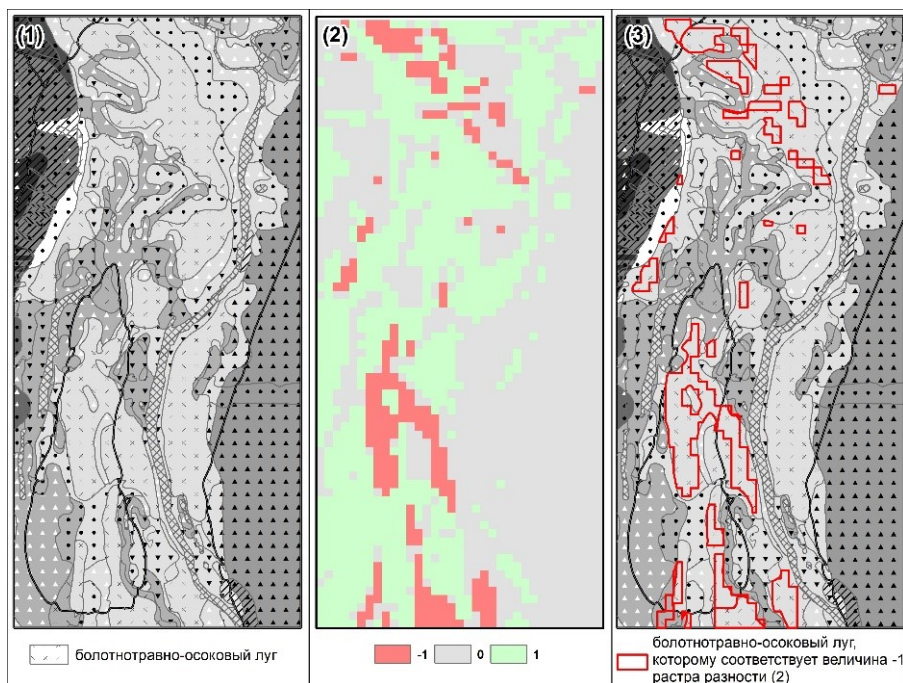


Рис. 8. Ландшафтная карта (1), растр разности 02.07–07.05.2022 (2) и результат их совмещения (3)

Fig. 8. Landscape map (1), difference raster 07.02–05.07.2022 (2) and the result of their combination (3)

Для обобщения результатов детального анализа состояния растительного покрова было выявлено соотношение площадей величин растров разности (рис. 9). Величина, равная 1, находится в пределах 1,6–53,6 % от площади всей ключевой территории и приходится на болотнотравно-осоковые луга, злаково-разнотравные луга, осоково-камышовые заболоченные луга и болота, пойменные леса с преобладанием ивы и черной ольхи. Величина, равная 0, находится в пределах 46,4–98,3 % от всей площади и приходится на болотнотравно-осоковые луга, злаково-разнотравные луга, сосновые насаждения, осоково-камышовые заболоченные луга и болота, пойменные леса с преобладанием ивы и черной ольхи. Величина, равная –1, находится в пределах 0–17,6 % от всей площади и приходится на болотнотравно-осоковые луга, злаково-разнотравные луга, осоково-камышовые заболоченные луга и болота.

Для каждого из растров индекса CVI (рис. 4–7), полученного на ключевую территорию, были рассчитаны площади значений (0, 1 и 2) индекса CVI в га (табл. 1). Значения площади, показанные в табл. 1, были усреднены (рис. 10).

Как видно из рис. 10, усредненное по площади максимальное значение индекса CVI, равное 2, занимает наибольшую площадь к июню, которая постепенно уменьшается к августу.

Для выявления того, какая именно растительность активно накапливает хлорофилл в течение вегетационного периода, был проведен детальный анализ с привлечением ландшафтной карты, составленной автором [Поletaев, 2023].

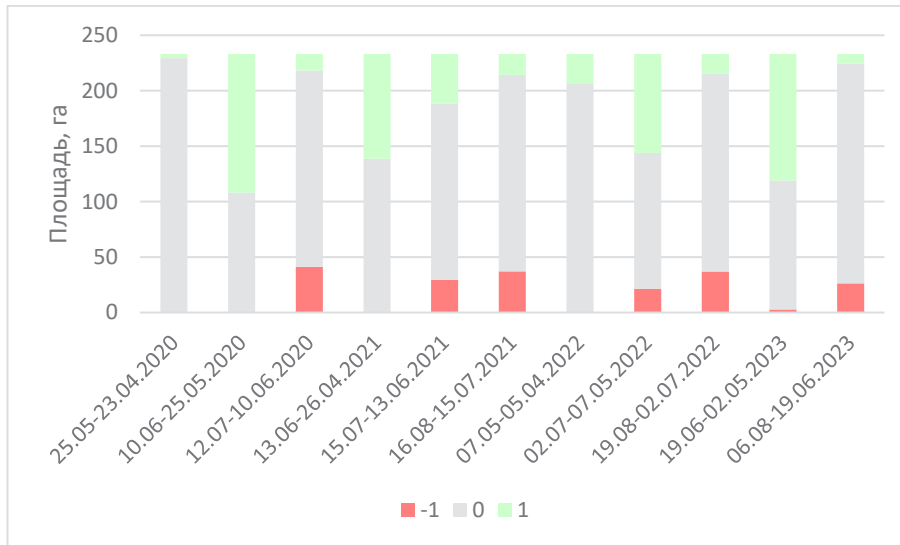


Рис. 9. Соотношение площадей величин растров разности
Fig. 9. Ratio of areas of difference raster values

Табл. 1. Соотношение площадей значений индекса CVI на ключевой территории
Table 1. Ratio of areas of CVI index values in a key area

Дата	Площадь, га		
	CVI = 0	CVI = 1	CVI = 2
23.04.2020	0,63	232,38	0,09
25.05.2020	0	229,95	3,15
10.06.2020	0	104,94	128,16
12.07.2020	0	131,22	101,88
26.04.2021	0,9	232,2	0
13.06.2021	0	139,59	93,51
15.07.2021	0	124,2	108,9
16.08.2021	0,09	142,38	90,63
05.04.2022	0,54	232,38	0,18
07.05.2022	0,45	206,46	26,19
02.07.2022	0	139,59	93,51
19.08.2022	0	158,94	74,16
02.05.2023	0,27	207,81	25,02
19.06.2023	0	97,02	136,08
06.08.2023	0	114,75	118,35

С помощью инструмента «Cell Statistics» ПО ArcGIS 10.5 было проведено усреднение значений индекса CVI для каждого из месяцев (апрель, май, июнь, июль, август) в рамках периода 2020–2023 гг. Растры усредненных таким образом значений индекса CVI были затем усреднены между собой для получения результирующего растра, который был сконвертирован в векторный формат. С помощью инструмента «Intersect» векторный слой усредненных значений индекса CVI был пересечен с векторным слоем ландшафтной карты данной территории. Затем усредненные значения индекса CVI были объединены в следующие группы: менее 1, 1,1–1,5, более 1,5 — для выявления пространственных особенностей варьирования усредненного значения индекса CVI. Для каждой группы была

подсчитана сумма площадей ареалов определенного типа растительности в соответствии с ландшафтной картой (табл. 2). В табл. 2 отсутствуют данные о растительности для площади, составляющей в сумме 14,28 га, по причине отсутствия на этой площади растительного покрова (она занята водной поверхностью, либо присутствует открытый грунт).

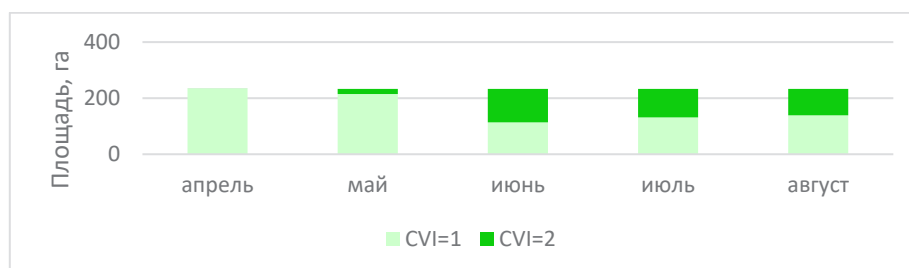


Рис. 10. Соотношение усредненных по площади значений индекса CVI с апреля по август 2020–2023 гг.

Fig. 10. The ratio of area-averaged CVI index values from April to August 2020–2023

Табл. 2. Усредненные значения индекса CVI и площади соответствующих им типов растительности
Table 2. Average values of the CVI index and the area of the corresponding vegetation types

Усредненное значение индекса CVI	Тип растительности	Площадь, га
<1 или 1	болотнотравно-осоковый луг	6,5
	злаково-разнотравный луг	7,4
	сосновые насаждения	42
	осоково-камышовые заболоченные луга и болота	4,2
	пойменные леса с преобладанием ивы и черной ольхи	4,8
1,1–1,5	болотнотравно-осоковый луг	42,4
	злаково-разнотравный луг	22,2
	сосновые насаждения	0,7
	осоково-камышовые заболоченные луга и болота	9,4
	пойменные леса с преобладанием ивы и черной ольхи	13,9
>1,5	болотнотравно-осоковый луг	12,5
	злаково-разнотравный луг	12
	осоково-камышовые заболоченные луга и болота	11,8
	пойменные леса с преобладанием ивы и черной ольхи	28,3

Из табл. 2 видно, что для территорий, на которых усредненное значение индекса CVI менее или равно 1, преобладающим типом растительности являются сосновые насаждения. Для территорий, где усредненное значение индекса CVI в пределах 1,1–1,5, преобладает луговая растительность, состоящая из болотнотравно-осоковых и злаково-разнотравных растительных ассоциаций. На территориях, где усредненное значение индекса CVI

составляет более 1,5, наибольшую площадь занимают пойменные леса с преобладанием ивы и черной ольхи.

На основании этого можно предположить, что природные комплексы, растительность которых представлена пойменными лесами, являются достаточно важным элементом пойменных ландшафтов, т. к. им соответствуют значительные по площади территории с наибольшим усредненным значением индекса CVI — 44 % от территории, где усредненное значение индекса CVI более 1,5.

ВЫВОДЫ

В ходе данной работы были выявлены пространственно-временные особенности изменения фотосинтетической активности растительного покрова в пределах долинно-речных ландшафтов, которые заключаются в увеличении более чем в 6,5 раз на ключевой территории площади наиболее активно вегетирующей растительности (CVI = 2) с мая по июнь. Использование растров вегетационного индекса CVI совместно с данными ландшафтной карты позволило выявить ареалы типов растительности, для которых характерна высокая фотосинтетическая активность в течении определенных временных интервалов вегетационного периода. К таким типам растительности можно отнести болотнотравно-осоковые луга и пойменные леса, состоящие из ивы и черной ольхи. Особенностью болотнотравно-осоковых лугов является активный рост содержания хлорофилла с апреля до начала мая, который сменяется к началу июля снижением содержания хлорофилла, как было выяснено при анализе изменения индекса CVI в 2022 г.; для них характерна также наибольшая площадь усредненного значения индекса CVI в пределах 1,1–1,5. Пойменные леса характеризуются наибольшей площадью усредненного значения индекса CVI более 1,5. Также было выявлено, что резкий рост площади максимального значения индекса CVI, равного 2, характерен для июня, согласно усредненным данным за 2020–2023 гг. Подводя итог, следует отметить эффективность совместного использования данных, полученных в ходе ландшафтных исследований, и результатов анализа изменения вегетационных индексов, т. к. это дает возможность получить новую информацию, которая поможет в принятии решений по рациональной организации природопользования в пределах долинно-речных ландшафтов. К таким решениям можно отнести проведение мероприятий, способствующих увеличению в пойменной части площади долинно-речных ландшафтов определенных растительных ассоциаций, наиболее эффективно связывающих диоксид углерода, например пойменных лесов в долине р. Северский Донец.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00169, <https://rscf.ru/project/23-17-00169/>.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was funded by the Russian Science Foundation, project No. 23-17-00169, <https://rscf.ru/en/project/23-17-00169/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Высоцкая А. А., Медведков А. А. Климатогенное «позеленение» курумных ландшафтов в долине нижнего течения реки Подкаменная Тунгуска. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 305–313. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-305-313.

Домнина Е. А., Тимонов А. С., Кантор Г. Я., Кислицына А. П., Савиных В. П. Опыт составления детальной карты растительности пойменного луга. Теоретическая и прикладная экология, 2017. № 1. С. 42–49.

Курганович К. А., Голятина М. А. Пространственно-временной отклик NDVI на изменение климатических характеристик в Забайкальском крае за период 2000–2014 гг. Вестник Забайкальского государственного университета, 2015. № 9. С. 10–20.

Кутузов А. В. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга систем «вода-суша» на равнинных водохранилищах (на примере Цимлянского водохранилища). Исследование Земли из космоса, 2011. № 6. С. 64–72.

Полетаев А. О. Прогностические возможности ГИС-технологий для определения границ зон затопления в пойменных ландшафтах (на примере рек Северский Донец и Нежеголь). Материалы XIV Международной ландшафтной конференции «Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии. VII Мильковские чтения». Воронеж, 2023. Т. 2. С. 277–280. DOI: 10.17308/978-5-9273-3693-7-2023-277-280.

Рыгалова Н. В., Плуталова Т. Г. Оценка связи NDVI степной растительности и радиального прироста сосны ленточных боров в засушливых условиях юга Западной Сибири. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции. М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 2. С. 355–367. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-355-367.

Терехин Э. А. Особенности многолетней динамики вегетационного индекса залежных земель на территории Центрального Черноземья. Региональные геосистемы, 2021. Т. 45. № 4. С. 505–515. DOI: 10.52575/2712-7443-2021-45-4-505-515.

Юдина Ю. В. Картографирование геосистем Белгородской области: региональные особенности. Современные проблемы науки и образования, 2013. № 6. С. 933.

Avetisyan D., Stankova N., Dimitrov Z. Assessment of spectral vegetation indices performance for post-fire monitoring of different forest environments. Fire, 2023. V. 6. No. 8. P. 290. DOI: 10.3390/fire6080290.

Chandrasekar K., Sesha Sai M. V. R., Roy P. S., Dwevedi R. S. Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS Vegetation Index product. International Journal of Remote Sensing, 2010. V. 31. No. 15. P. 3987–4005. DOI: 10.1080/01431160802575653.

Geerling G. W., Labrador-Garcia M., Clevers J. G. P. W., Ragas A. M. J., Smits A. J. M. Classification of floodplain vegetation by data fusion of spectral (CASI) and LiDAR data. International Journal of Remote Sensing, 2007. V. 28. No. 19. P. 4263–4284. DOI: 10.1080/01431160701241720.

Hunt E. R., Daughtry C. S. T., Eitel J. U. H., Long D. S. Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index. Agronomy Journal, 2011. V. 103. No. 4. P. 1090–1099. DOI: 10.2134/agronj2010.0395.

Kooistra L., Salas E. A. L., Clevers J. G. P. W., Wehrens R., Leuven R. S. E. W., Nienhuis P. H., Buydens L. M. C. Exploring field vegetation reflectance as an indicator of soil contamination in river floodplains. Environmental Pollution, 2004. V. 127. No. 2. P. 281–290. DOI: 10.1016/S0269-7491(03)00266-5.

Lisetskii F. N., Poletaev A. O., Buryak Z. A. Geoinformation support for studies of the boundaries of flood zones in urban areas. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2022. V. 2388. No. 1. P. 012134. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012134.

- Marinina O. A., Yermolaev O. P., Maltsev K. A., Lisetskii F. N., Pavlyuk Y. V.* Evaluation of siltation of rivers with intensive economic development of watersheds. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016. V. 11. No. 14. P. 3004–3013. DOI: 10.3923/jeasci.2016.3004.3013.
- Poletaev A., Lisetskii F.* Using vegetation indices to identify high chlorophyll tree cover in floodplains for carbon sequestration. *E3S Web of Conferences*, 2024. V. 486. 07013. DOI: 10.1051/e3sconf/202448607013.
- Sims N. C., Colloff M. J.* Remote sensing of vegetation responses to flooding of a semi-arid floodplain: Implications for monitoring ecological effects of environmental flows. *Ecological Indicators*, 2012. V. 18. P. 387–391. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.12.007.
- Van Iersel W., Straatsma M., Middelkoop H., Addink E.* Multitemporal classification of river floodplain vegetation using time series of UAV images. *Remote Sensing*, 2018. V. 10. No. 7. P. 1144. DOI: 10.3390/rs10071144.
- Vincini M., Calegari F., Casa R.* Sensitivity of leaf chlorophyll empirical estimators obtained at Sentinel-2 spectral resolution for different canopy structures. *Precision Agriculture*, 2016. V. 17. No. 3. P. 313–331. DOI: 10.1007/s11119-015-9424-7.
- Zhu X., Li Q., Guo C.* Evaluation of the monitoring capability of various vegetation indices and mainstream satellite band settings for grassland drought. *Ecological Informatics*, 2024. 102717. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2024.102717.

REFERENCES

- Avetisyan D., Stankova N., Dimitrov Z.* Assessment of spectral vegetation indices performance for post-fire monitoring of different forest environments. *Fire*, 2023. V. 6. No. 8. P. 290. DOI: 10.3390/fire6080290.
- Chandrasekar K., Sesha Sai M. V. R., Roy P. S., Dwevedi R. S.* Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS Vegetation Index product. *International Journal of Remote Sensing*, 2010. V. 31. No. 15. P. 3987–4005. DOI: 10.1080/01431160802575653.
- Domnina E. A., Timonov A. S., Kantor G. Y., Kislitsyna A. P., Savinykh V. P.* Experience of detailed mapping of floodplain meadow vegetation. *Theoretical and Applied Ecology*, 2017. No. 1. P. 42–49 (in Russian).
- Geerling G. W., Labrador-Garcia M., Clevers J. G. P. W., Ragas A. M. J., Smits A. J. M.* Classification of floodplain vegetation by data fusion of spectral (CASI) and LiDAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 2007. V. 28. No. 19. P. 4263–4284. DOI: 10.1080/01431160701241720.
- Hunt E. R., Daughtry C. S. T., Eitel J. U. H., Long D. S.* Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index. *Agronomy Journal*, 2011. V. 103. No. 4. P. 1090–1099. DOI: 10.2134/agronj2010.0395.
- Kooistra L., Salas E. A. L., Clevers J. G. P. W., Wehrens R., Leuven R. S. E. W., Nienhuis P. H., Buydens L. M. C.* Exploring field vegetation reflectance as an indicator of soil contamination in river floodplains. *Environmental Pollution*, 2004. V. 127. No. 2. P. 281–290. DOI: 10.1016/S0269-7491(03)00266-5.
- Kurganovich K. A., Golyatina M. A.* Spatiotemporal response of NDVI to changes in climatic characteristics in the Trans-Baikal Territory for the period 2000–2014. *Transbaikal State University Journal*, 2015. No. 9. P. 10–20 (in Russian).
- Kutuzov A. V.* Monitoring of the large flat water reservoirs using remote sensing data. *Issledovanie Zemli iz kosmosa (Earth Observation and Remote Sensing)*, 2011. No. 6. P. 64–72 (in Russian).

- Lisetskii F. N., Poletaev A. O., Buryak Z. A.* Geoinformation support for studies of the boundaries of flood zones in urban areas. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2022. V. 2388. No. 1. 012134. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012134.
- Marinina O. A., Yermolaev O. P., Maltsev K. A., Lisetskii F. N., Pavlyuk Y. V.* Evaluation of siltation of rivers with intensive economic development of watersheds. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016. V. 11. No. 14. P. 3004–3013. DOI: 10.3923/jeasci.2016.3004.3013.
- Poletaev A. O.* Predictive capabilities of GIS technologies for determining the boundaries of flood zones in floodplain landscapes (using the example of the Seversky Donets and Nezhegol rivers). *Proceedings of the XIV International Landscape Conference “Theoretical and Applied Problems of Landscape Geography. VII Milkov Readings”*. Voronezh, 2023. V. 2. P. 277–280 (in Russian). DOI: 10.17308/978-5-9273-3693-7-2023-277-280.
- Poletaev A., Lisetskii F.* Using vegetation indices to identify high chlorophyll tree cover in floodplains for carbon sequestration. *E3S Web of Conferences*, 2024. V. 486. 07013. DOI: 10.1051/e3sconf/202448607013.
- Rygalova N. V., Plutalova T. G.* Estimation of the relation of NDVI steppe vegetation and radial growth of pine belt forests in arid conditions of the south of Western Siberia. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference*. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2021. V. 27. Part 2. P. 355–367 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-355-367.
- Sims N. C., Colloff M. J.* Remote sensing of vegetation responses to flooding of a semi-arid floodplain: Implications for monitoring ecological effects of environmental flows. *Ecological Indicators*, 2012. V. 18. P. 387–391. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.12.007.
- Terekhin E. A.* Long-term dynamics of the vegetation index for abandoned farmlands in the Central Chernozem Region of Russia. *Regional Geosystems*, 2021. V. 45. No. 4. P. 505–515 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2021-45-4-505-515.
- Van Iersel W., Straatsma M., Middelkoop H., Addink E.* Multitemporal classification of river floodplain vegetation using time series of UAV images. *Remote Sensing*, 2018. V. 10. No. 7. P. 1144. DOI: 10.3390/rs10071144.
- Vincini M., Calegari F., Casa R.* Sensitivity of leaf chlorophyll empirical estimators obtained at Sentinel-2 spectral resolution for different canopy structures. *Precision Agriculture*, 2016. V. 17. No. 3. P. 313–331. DOI: 10.1007/s11119-015-9424-7.
- Vysotskaya A. A., Medvedkov A. A.* Climate-driven “greening” of the kurum landscape in the valley of the lower reaches of the Podkamennaya Tunguska river. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference*. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2022. V. 28. Part 1. P. 305–313 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-305-313.
- Yudina Yu. V.* Mapping geosystems of the Belgorod region: regional features. *Modern Problems of Science and Education*, 2013. No. 6. P. 933 (in Russian).
- Zhu X., Li Q., Guo C.* Evaluation of the monitoring capability of various vegetation indices and mainstream satellite band settings for grassland drought. *Ecological Informatics*, 2024. 102717. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2024.102717.