

Научная статья
УДК 630*182.21(574.42):528.88
doi: 10.17223/19988591/59/5

Использование зимних и ранневесенних космоснимков для оценки проективного покрытия березняков на залежах

Николай Иванович Федоров¹, Ильшат Ринатович Туктамышев²,
Павел Сергеевич Широких³, Василий Борисович Мартыненко⁴,
Лениза Гумеровна Наумова⁵

^{1, 2, 3, 4} Уфимский институт биологии УФИЦ РАН, Уфа, Россия

⁵ Башкирский государственный педагогический университет им. Акмуллы, Уфа, Россия

¹ fedorov@anrb.ru

² ishatik@yandex.ru

³ shirpa@mail.ru

⁴ vasmar@anrb.ru

⁵ leniza.gumerovna@yandex.ru

Аннотация. На примере зарастающих сельскохозяйственных угодий, расположенных в зоне широколиственных лесов Республики Башкортостан, рассмотрена возможность оценки проективного покрытия формирующихся на залежах березняков по значениям спектральной яркости каналов зимних и ранневесенних космоснимков, а также по значениям нормализованного разностного индекса лесного снега NDFSИ. В качестве исходных данных использованы проективное покрытие древесного яруса на 189 модельных участках березняков, описанных в июле 2021 г., и космоснимки Sentinel-2, Landsat 7 и Landsat 8. Наилучшие результаты получены при использовании красного канала ранневесенних снимков в период сохранения снежного покрова (с середины марта до первой половины апреля). Корреляция между проективным покрытием и спектральной яркостью красного канала составила –0,90. Модель позволяет достаточно точно определять проективное покрытие березняков возрастом от 18 до 20 лет, которые преобладают на залежах в зоне распространения широколиственных лесов в Республике Башкортостан. Установлена возможность использования полученных моделей для оценки проективного покрытия березняков на более ранних стадиях зарастания сельскохозяйственных угодий.

Ключевые слова: заброшенные сельскохозяйственные угодья, зарастание, березняки, Sentinel-2, Landsat, спектральные каналы, Южно-Уральский регион, Предуралье

Источник финансирования: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-24-00186, <https://rscf.ru/project/22-24-00186/>

Для цитирования: Федоров Н.И., Туктамышев И.Р., Широких П.С., Мартыненко В.Б., Наумова Л.Г. Использование зимних и ранневесенних космоснимков для оценки проективного покрытия березняков на залежах // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2022. № 59. С. 110–127. doi: 10.17223/19988591/58/5

Application of the Winter and Early-Spring Satellite Images for Assessment of the Birch Forest Coverage on the Abandoned Agricultural Lands

Nikolay I. Fedorov¹, Ilshat R. Tuktamyshev², Pavel S. Shirokikh³,
Vasily B. Martynenko⁴, Leniza G. Naumova⁵

^{1, 2, 3, 4}Ufa Institute of Biology, Ufa Federal Scientific Centre
of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

⁵Bashkir State Pedagogical University n.a. M. Akmulla, Ufa, Russian Federation

¹fedorov@anrb.ru

²ishatik@yandex.ru

³shirpa@mail.ru

⁴vasmar@anrb.ru

⁵leniza.gumerovna@yandex.ru

Summary. More than 40 million hectares of agricultural land were abandoned after the collapse of the Soviet Union. A significant part of the land is covered by spontaneously regenerating woody and shrubby vegetation. When identifying the forest regeneration, the stands with a tree cover of more than 50% are accurately identified. It is difficult to identify the initial stages of forest regeneration on the abandoned agricultural lands using summer satellite images because of little difference between the young trees and saplings due to their low height and low density on the one hand, and herbaceous vegetation on the other. The purpose of this work was to apply winter and early-spring satellite images for assessments of the tree cover of birch-dominated stands (*Betula pendula* Roth.) formed on the abandoned agricultural lands (See Fig. 1).

We used 189 relevés of birch forests on the abandoned agricultural lands in the broad-leaved forest zone of the Republic of Bashkortostan. A regression analysis of the evaluation of the tree cover was carried out using the values of the spectral reflectance of the RED, NIR, SWIR11, and SWIR12 bands, as well as the values of the NDFS snow index from seven cloudless Sentinel-2 images taken between 04.11.2020 and 13.05.2021 (See Fig. 2, 3). When selecting optimal regression models, the values of correlation coefficients (R) and determination coefficients (R²) were used to assess the model quality. To test the possibility of using the obtained models for assessing the tree cover of the stand at earlier succession stages, we involved the data on the tree cover from 36 geobotanical relevés, where the crown density of the stand was visually evaluated in July 2013. Then, the described procedure was applied to calculate the tree cover using the Landsat-8 image taken on 25.03.2014.

When creating regression models to calculate the tree cover, the best results were obtained using the red band of early spring images during the period when snowpack is still solid (from mid-March to the first half of April) (See Table 1). The correlation between the tree cover and the spectral reflectance of the red band was -0.90. The model allowed us to determine accurately the tree cover of birch forests aged from 18 to 20 years which prevail in the zone of broad-leaved forests in the Republic of Bashkortostan. The accuracy of the model for determining the tree cover according to the obtained regression models for other dates is unstable and highly likely influenced by the snow depth and the seasonal dynamics of changes in the radiation intensity of the red and infrared bands (See Table 2, 3).

To conclude, the equations calculated from modern satellite images can be used to assess the tree cover using retrospective images at earlier succession stages of the

abandoned field recovery. When using early-spring images, the snow depth should be taken into account since the snowpack melting dates can vary greatly from year to year.

The paper contains 3 Figures, 3 Tables, and 41 References.

Keywords: abandoned agricultural lands, spontaneous forest regeneration, birch forests, Sentinel-2, Landsat-8, spectral bands, the Urals

Funding: The study was supported by the grant from the Russian Science Foundation No. 22-24-00186, <https://rscf.ru/project/22-24-00186/>

For citation: Fedorov NI, Tuktamyshev IR, Shirokikh PS, Martynenko VB, Naumova LG. Application of the Winter and Early-Spring Satellite Images for Assessment of the Birch Forest Coverage on the Abandoned Agricultural Lands. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2022;59:110-127. doi: 10.17223/19988591/59/5

Введение

После распада Советского Союза было заброшено более 40 млн га сельскохозяйственных угодий [1]. Значительная часть из них зарастает древесно-кустарниковой растительностью [2–6]. Территория Республики Башкортостан входит в число регионов с наибольшим процентом неиспользуемых пахотных сельскохозяйственных угодий, зарастающих лесной растительностью, и их площадь составляет более 4 млн га [7]. Большая часть зарастающих лесом участков по-прежнему числится как сельскохозяйственные земли, и реальный масштаб этой ситуации изучен не до конца. В зависимости от стадии сукцессии и почвенных условий зарастающие лесом участки могут быть в дальнейшем использованы в качестве источника древесины или же после раскорчевки в качестве сельхозугодий. Для выявления и картирования зарастающих лесом сельхозугодий достаточно эффективно использование данных, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов или космических спутников Земли [8–9]. Они позволяют выявлять формы землепользования и изменения растительности на участках заброшенных пахотных полей [10–15]. При проведении исследования на локальных территориях наиболее часто используются данные спутников серии Landsat [16], а также спутника Sentinel-2, а для оценок на уровне регионов – снимки MODIS с разрешением 250–500 м [17]. Для идентификации заброшенных земель на основе многолетних серий данных может использоваться многолетний тренд временных рядов изменения значений нормализованного относительного вегетационного индекса растительности (NDVI) в процессе формирования залежной растительности [14]. Так, для дифференциации пашни и залежей используются изменения NDVI на пашнях, связанных с циклом посев–рост–сбор урожая, которые не наблюдаются на заброшенных полях [18]. Индекс NDVI иногда используется в сочетании с другими индексами [19], в том числе с коротковолновым вегетационным индексом (SWVI) [20] и вегетационным индексом стареющей растительности на основе красного и среднего инфракрасного каналов (NDSVI) [19, 21]. При оценке информативности отдельных спек-

тральных каналов мультиспектральных снимков отмечается информативность красного канала для анализа зарастания нелесных земель по разновременным снимкам [19].

При выявлении зарастающих залежей достаточно точно выделяются участки древостоя с проективным покрытием только более 50% [19, 22–24]. При этом есть необходимость выявления начальных стадий зарастания лесом залежей для анализа восстановительных сукцессий, оценки площадей неиспользуемых земель, а также потенциала депонирования углерода этой растительностью [25–31]. Препятствием для выявления начальных стадий зарастания древесными видами заброшенных сельскохозяйственных угодий по летним космоснимкам является слабое отличие древесного подроста от травянистой растительности из-за его низкой высоты и небольшой сомкнутости. Вместе с тем есть опыт использования зимних снимков для оценки плотности и запаса древесины стволов взрослого древостоя с использованием красного канала. Методика основана на корреляции интенсивности отражения от снега солнечных лучей межкрановых пространств с этими лесохозяйственными характеристиками [32–33]. Для решения обратной задачи – оценки количества снега в кронах деревьев – используется относительный нормализованный индекс лесного снега (NDFSИ) [34]. Таким образом, нами сделано предположение, что космоснимки, отснятые в период наличия устойчивого снежного покрова, могут быть также использованы и для оценки проективного покрытия, формирующегося в ходе лесовосстановительной сукцессии древостоя на залежах. Цель данной работы – анализ возможностей использования зимних и ранневесенних космоснимков для оценки проективного покрытия древостоя с доминированием берёзы повислой (*Betula pendula* Roth.), формирующегося на заброшенных пашнях в зоне распространения широколиственных лесов Республики Башкортостан.

Материалы и методики исследования

Сбор основного полевого материала для исследования проводился в июле 2021 г. на участке зарастающих лесом сельскохозяйственных угодий размером 10 × 10 км в зоне широколиственных лесов в Мишкинском районе Республики Башкортостан (рис. 1).

Сельскохозяйственное использование участков пашни, занятых в настоящее время залежной растительностью, прекратилось в начале 2000-х гг., и в момент проведения исследования на большинстве участков залежей возраст древостоя с доминированием берёзы (*B. pendula*) составлял 18–20 лет. Тем не менее на отдельных участках встречались более молодые деревья возрастом от 11 до 15 лет, что связано как с более поздним прекращением использования отдельных участков полей, так и, в некоторых случаях, с большей удаленностью от источников семян. Высота древостоя на залежах в момент проведения исследования составляла в среднем 12 м (от 5 до 18 м).

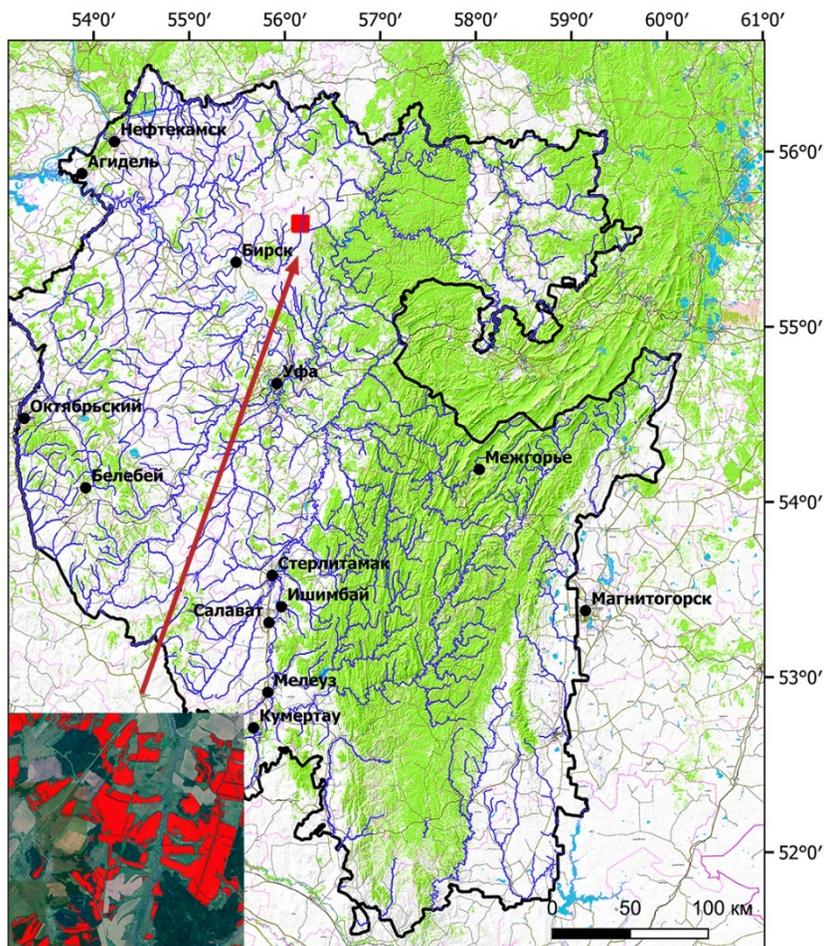


Рис. 1. Модельный участок территории заброшенных сельскохозяйственных угодий, зарастающих березняками, расположенный в зоне широколиственных лесов в Мишкинском районе Республики Башкортостан. Красным цветом на выноске показаны зарастающие лесом залежи

[Fig. 1. Model site of abandoned agricultural land overgrown with birch forests located in the zone of broad-leaved forests in the Mishkinsky district of the Republic of Bashkortostan. The abandoned fields covered by birch young trees and saplings are shown in red on the inset map]

В древесном ярусе березняков единично встречались осина (*Populus tremula* L.), ива козья (*Salix caprea* L.), вяз (*Ulmus glabra* Huds.), а также сосна (*Pinus sylvestris* L.) (вблизи посадок этого вида). На предварительном этапе с использованием пакета QGIS 3.24 [35] была создана сеточная карта с размером ячеек 30 × 30 м, границы которых совпадали с границами пикселей космоснимков Landsat 5–8, что позволило использовать разновременные космоснимки для создания маски залежей. Сеточный слой использовался для подбора на снимке Google участков с различной сомкнутостью древесного яруса. В период экспедиции на этих участках закладывались

пробные площади размером 30 × 30 м, центры которых совпадали с центрами отобранных ячеек сеточной карты. Всего было заложено 189 пробных площадей, на которых отмечались сомкнутость крон, состав и высота древостоя. Высота древостоя отмечалась по породам. Пробные площади с участием сосны из анализа исключались.

Для анализа возможностей оценки проективного покрытия древостоя по зимним и ранневесенним космоснимкам использованы семь безоблачных снимков Sentinel-2, отснятых в период с 04.11.2020 г. по 13.05.2021 г., полученных с сайта USGS [36]. Снимок от 08.04.2021 г. является последним снимком, отснятым в период наличия устойчивого снежного покрова. При расчетах использованы значения спектральной яркости каналов: красного (RED) в диапазоне 0,645–0,683 мкм, ближнего инфракрасного (NIR) в диапазоне 0,763–0,908 мкм, а также двух коротковолновых инфракрасных каналов в диапазоне 1,542–1,685 мкм (SWIR11) и в диапазоне 2,081–2,323 мкм (SWIR12). Кроме того, использовался нормализованный разностный индекс лесного снега NDFSИ, который рассчитывается по формуле

$$\text{NDFSИ} = \frac{(\text{NIR} - \text{SWIR12})}{(\text{NIR} + \text{SWIR12})}.$$

Расчет средних значений спектральной яркости пикселей, соответствующих пробным площадям, проводился модулем QGIS «Зональная статистика» [35]. Регрессионный анализ расчета проективного покрытия березняков по полученным значениям спектральной яркости каналов и значений NDFSИ проводился в программе «Statgraphics Centurion 19», при подборе оптимальных регрессионных моделей использован алгоритм «Comparison of Alternative Models» [37]. В качестве критериев качества модели использовались величины значений коэффициентов корреляции (R) и детерминации (R²). Для проверки возможностей использования полученных моделей для оценки проективного покрытия древостоя на более ранних сукцессионных стадиях проводился расчёт проективного покрытия березняков по снимку Landsat 8 от 25.03.2014 для 36 площадок, соответствующих геопривязанным геоботаническим описаниям, на которых выполнялась оценка сомкнутости крон древостоя в июле 2013 г.

Результаты исследования и обсуждения

На начальном этапе исследования по всем имеющимся космоснимкам рассчитывались регрессионные уравнения оценки проективного покрытия березняков по значениям яркости каналов и NDFSИ. В период наличия снежного покрова они почти во всех случаях аппроксимировались нелинейными уравнениями. Из рис. 2 видно, что в отсутствие снежного покрова в осенний период все модели характеризовались относительно низкими значениями коэффициентов корреляции (R) и детерминации (R²), что объясняется наличием травянистой растительности, опавших листьев и открытой почвы, которые вносили существенный вклад в поглощение в использованных при построении моделей спектрах.

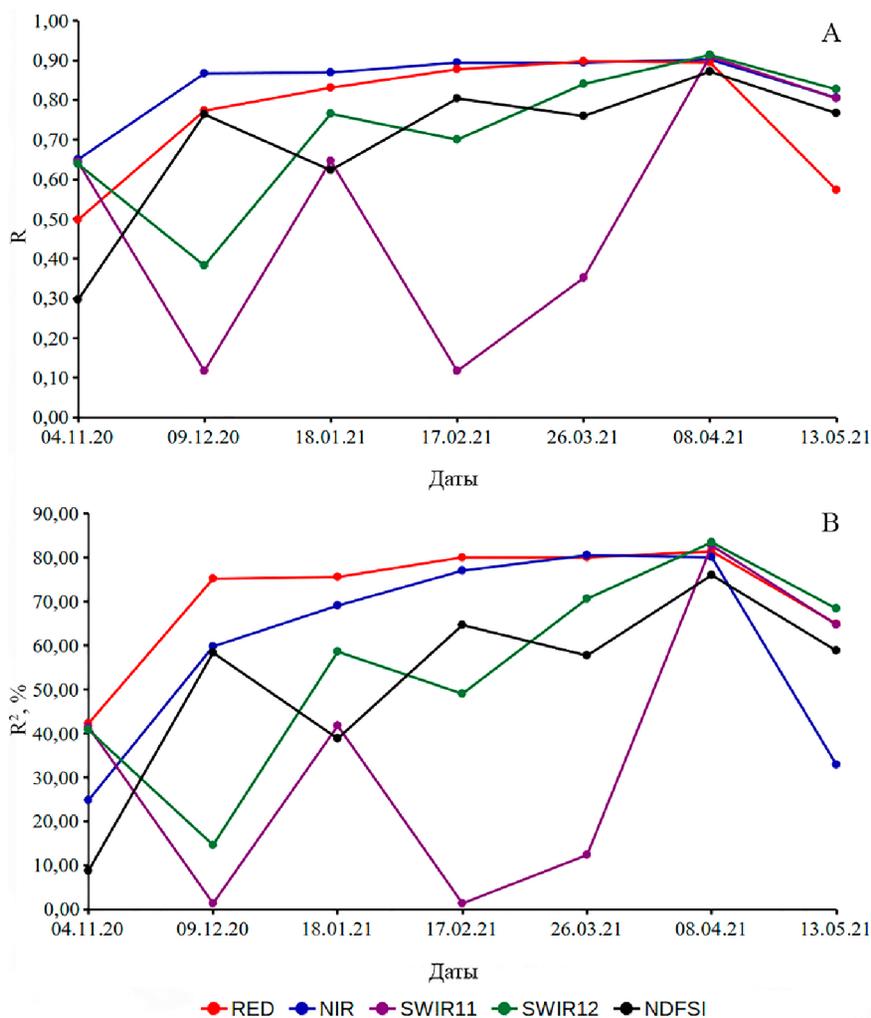


Рис. 2. Временная динамика коэффициентов корреляции (R) и детерминации (R^2) регрессионных моделей проективного покрытия березняков на заброшенных сельскохозяйственных угодьях, рассчитанных по спектральной яркости красного и ближних инфракрасных каналов и индекса NDFS1: А – коэффициент корреляции (значения приведены по модулю для удобства сопоставления с R^2); В – коэффициент детерминации

[Fig. 2. Temporal dynamics of changes in the coefficients of correlation (R) and determination (R^2) of regression models for the birch forest cover on the abandoned agricultural land, calculated from the spectral reflectance of red and near infrared bands, as well as the NDFS1 index: А – correlation; В – determination]

У моделей, рассчитанных по каналам RED и NIR, эти значения минимальны, а у остальных моделей есть более низкие значения в зимний период. В первой половине мая у всех моделей значения этих коэффициентов снова снижаются вследствие вклада в поглощение открытой почвы. Особен-

но сильное падение значений рассматриваемых коэффициентов отмечается у модели, построенной по ближнему инфракрасному каналу NIR. В целом с поздней осени до ранней весны значения коэффициентов R и R^2 у каждой из полученных моделей изменялись сходным образом. В зимний период вариабельность этих коэффициентов у моделей, рассчитанных по каналам RED и NIR, оказался значительно ниже, чем в моделях, рассчитанных по каналам SWIR11, SWIR12 и с использованием индекса NDFSИ. При этом с ноября по декабрь значение R^2 у модели по RED быстрее повышается, чем у модели по NIR, а значение R быстрее повышается у модели по NIR. В ранневесенний период (26.03 и 08.04.2021) коэффициенты у этих двух моделей не различались.

Причины вариабельности R и R^2 у моделей, построенных по SWIR11, SWIR12 и NDFSИ, не ясны. Было бы логично предположить, что она связана с климатическими отклонениями в дни пролета спутника. Однако по данным ближайшей метеостанции, расположенной в 35 км (г. Бирск), непосредственно в даты или накануне космосъемки сильных отклонений по температуре воздуха или количеству выпавших осадков не наблюдалось. Таким образом, при моделировании проективного покрытия древесостоя наиболее стабильные результаты могут быть получены при использовании каналов RED и NIR космоснимков, отснятых в конце марта – начале апреля. Из рис. 2 видно, что наиболее оптимальным для моделирования является снимок от 08.04.2021 г. Возможно, это связано с тем, что во второй половине марта – начале апреля толщина снежного покрова снизилась в связи с повышением дневных температур до положительных [38], что несколько увеличило высоту надснежной части стволов деревьев. Кроме того, на ветвях деревьев в начале апреля растаял снег. Результаты регрессионного анализа оценки проективного покрытия древесного яруса по значениям яркости каналов RED и NIR по снимку, отснятому 08.04.2021 г., приведены на рис. 3 и в табл. 1.

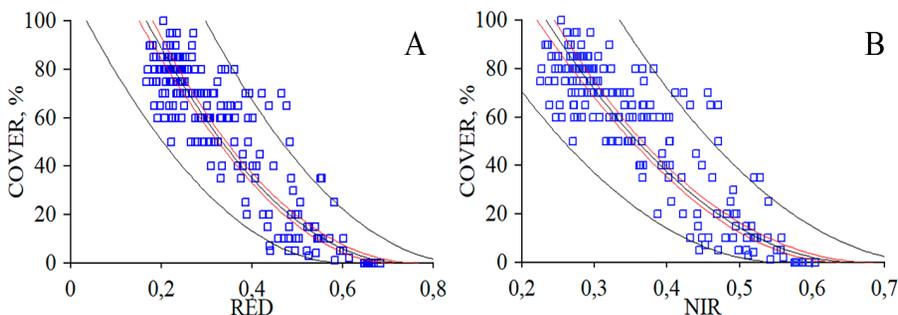


Рис. 3. Регрессионные модели оценки проективного покрытия древесного яруса (COVER) по значениям яркости каналов космоснимка Sentinel-2, отснятого 08.04.2021 г.: *A* – по красному (RED); *B* – по ближнему инфракрасному (NIR) каналам

[Fig. 3. Regression models for estimating the layer cover (COVER) by the reflectance values of the Sentinel-2 bands of the satellite image taken on 08.04.2021: *A* – red (RED); *B* – near infrared (NIR) bands]

Таблица 1 [Table 1]

Регрессионная модель оценки проективного покрытия березняков по значениям красного (RED) и ближнего инфракрасного (NIR) каналов, рассчитанным по космоснимку Sentinel-2 от 08.04.2021 г.

[Regression model of the evaluation of the birch forest cover using the values of the RED and NIR bands calculated from the Sentinel-2 image taken on 08.04.2021]

Параметр [Parameter]	Формула [Formula]	R	R ²	Стандартная ошибка [Standard error]
RED	$COVER = (12,9157 - 17,4905 \times RED)^2$	-0,90	81,39	1,1
NIR	$COVER = (15,4343 - 23,2979 \times NIR)^2$	-0,89	80,07	1,2

Примечание. RED – значения красного канала, NIR – значения ближнего инфракрасного канала, COVER – проективное покрытие.

[Note. RED – red band values, NIR – near infrared band values, COVER – tree layer cover].

В обоих случаях полученные модели описывались одинаковыми нелинейными уравнениями. Уравнения имеют близкие значения коэффициента R, коэффициента R² и стандартной ошибки. Далее проводилась оценка возможности использования этих регрессионных моделей для анализа проективного покрытия по космоснимкам на другие даты. В табл. 2 приведены результаты расчета проективного покрытия березняков по каналам RED и NIR семи космоснимков с использованием формул, приведенных в табл. 1. Из таблицы видно, что есть четко выраженная тенденция увеличения ошибки определения проективного покрытия в более ранние сроки проведения космосъемки. Случаи завышения расчетных показателей, включая значительно больше 100%, отмечаются в отсутствие снежного покрова или же при неполном покрытии снегом остатков растительности нижних ярусов и лежащих на земле стволов и ветвей отпада древостоя. На изменение точности определения проективного покрытия кроме глубины снежного покрова может также влиять сезонная динамика изменения интенсивности излучения в красном и инфракрасном спектре. При уменьшении высоты солнцестояния в зимний период солнечный спектр обогащается в красном диапазоне, и максимум излучения смещается в длинноволновую область [39]. Однако при этом уровень радиации с января по май увеличивается в несколько раз [40]. Таким образом, при расчетах по рассматриваемым регрессионным уравнениям вследствие изменения уровня радиации и высоты снежного покрова одним и тем же значениям яркости пикселей каналов RED или NIR на более ранних датах соответствует большее проективное покрытие, чем по космоснимку от 08.04.2021.

Наиболее важной является задача выявления начальной стадии зарастания залежей лесом. Из табл. 2 видно, что для участков с отсутствием древесной растительности относительно приемлемые результаты оценки проективного покрытия с использованием регрессионного уравнения по каналу RED получены начиная с середины февраля при глубине снега 45 см, что достаточно, чтобы остатки травяной растительности (жесткие стебли некоторых видов) были полностью погребены под снегом. Таким образом,

при использовании зимних и ранневесенних снимков обнаруживается отличие безлесных участков от участков с низким проективным покрытием древостоя, что недостижимо при использовании летних снимков [41]. Проективное покрытие древостоя достаточно точно оценивается при расчетах по космоснимку, снятому 08.04.2021 г. На предыдущую дату съемки уже отмечается занижение рассчитанного проективного покрытия, точность оценки которого возрастает при увеличении густоты древостоя.

Таблица 2 [Table 2]

Глазомерная и рассчитанная по яркости красного (RED) и ближнего инфракрасного (NIR) каналов космоснимков оценки проективного покрытия древостоя березняков

[Comparison between the visual evaluation of the birch tree cover and the values calculated using reflectance of the red (RED) and near infrared (NDIR) bands of satellite images]

Число площадок [Number of sites], шт.	Глазомерная оценка [Eye assessment]	Проективное покрытие, рассчитанное по яркости каналов космоснимков на разные даты, % [Projective coverage calculated from the reflectance of satellite image channels for different dates, %]						
		04.11.20	09.12.20	18.01.21	17.02.21	26.03.21	08.04.21	13.05.21
10	0	<u>147,2*</u> 150,4	<u>25,0</u> 16,3	<u>10,3</u> 3,2	<u>2,0</u> 0,4	<u>0,5</u> 4,9	<u>1,8</u> 3,2	<u>138,6</u> 133,9
10	1–5 (4,0**)	<u>142,5</u> 149,9	<u>70,3</u> 58,2	<u>47,1</u> 34,1	<u>23,0</u> 15,2	<u>4,9</u> 1,4	<u>13,0</u> 12,2	<u>133,8</u> 106,5
18	7–15 (11,2)	<u>143,8</u> 155,0	<u>78,5</u> 69,7	<u>54,7</u> 43,9	<u>23,5</u> 14,0	<u>6,2</u> 1,9	<u>15,9</u> 15,7	<u>138,4</u> 106,6
10	20–25 (21,5)	<u>144,6</u> 156,2	<u>83,4</u> 74,3	<u>60,8</u> 48,4	<u>33,0</u> 24,0	<u>12,2</u> 5,9	<u>22,9</u> 22,8	<u>140,6</u> 107,6
29	30–50 (43,4)	<u>147,2</u> 160,4	<u>103,9</u> 98,8	<u>91,1</u> 83,5	<u>62,5</u> 56,9	<u>31,6</u> 20,9	<u>43,4</u> 42,1	<u>148,6</u> 101,6
67	60–75 (66,8)	<u>149,4</u> 165,9	<u>120,2</u> 118,1	<u>111,3</u> 108,3	<u>86,5</u> 86,7	<u>52,9</u> 42,6	<u>64,1</u> 63,6	<u>153,9</u> 97,7
55	80–100 (84,0)	<u>150,7</u> 169,4	<u>128,7</u> 128,1	<u>123,8</u> 124,5	<u>103,5</u> 109,8	<u>68,3</u> 59,2	<u>78,9</u> 79,8	<u>156,3</u> 93,8
Толщина снежного покрова, см [Snowpack thickness, cm]		0	9	31	45	58	20	0

Примечание. * Числитель – расчёт по красному (RED) каналу, знаменатель – по ближнему инфракрасному (NIR) каналу; ** среднее проективное покрытие.

[Note. * Numerator – the value calculated from the red (RED) band, denominator – the value calculated from the near-infrared (NIR) band; ** the average tree layer cover].

Расчет по регрессионному уравнению для показателей NIR по космоснимку, снятому 08.04.2021 г., имеет примерно такую же точность, как и расчет по регрессионному уравнению с использованием RED. Вместе с тем при расчете по космоснимку от 26.03.2021 г. отмечается большее занижение проективного покрытия, чем при расчете с использованием RED.

В связи с этим регрессионные модели, рассчитанные по каналам зимних космоснимков, могут быть использованы только при расчетах по космоснимкам на очень близкие даты, так как даже двухнедельное различие во времени съемки может привести к неточности в оценке проективного покрытия малосомкнутых древостоев. Оптимальным вариантом является проведение расчетов с использованием регрессионных уравнений, построенных по современному космоснимку, наиболее близкому к дате съемки космоснимка, который используется для оценки проективного покрытия березняков более ранней стадии зарастания залежей.

Представляет интерес анализ возможности использования рассчитанных моделей для оценки проективного покрытия древостоя на более ранних стадиях зарастания заброшенных сельскохозяйственных земель. В июле 2013 г. на территории исследования было выполнено 36 геоботанических описаний залежей размером 10 × 10 м с возобновлением березняков. Результаты оценки проективного покрытия древостоя по космоснимку Landsat-8 от 25.03.2014 г. с использованием регрессионных моделей, рассчитанных по космоснимкам, отснятым 26.03 и 08.04.2021 г., приведены в табл. 3.

Таблица 3 [Table 3]

Параметры древостоя, учтенные в геоботанических описаниях 2013 г., и рассчитанное проективное покрытие по регрессионным уравнениям (построенным по снимкам 2021 г.)

[Forest characteristics counted in relevés compared to the tree layer cover calculated using the regression analysis (from the 2021 imagery)]

Проективное покрытие древостоя, %			Средняя высота древостоя, м	Средний возраст, год	Количество описаний, шт.
Оцененное глазомерно	Рассчитанное по RED	Рассчитанное по NIR			
0	<u>1,0*</u> 7,7	<u>0,2</u> 11,3	–	–	5
1	<u>0,1</u> 8,5	<u>0,3</u> 10,6	1,2 (0,8–1,5)	3 (3–4)	3
5	<u>5,3</u> 14,5	<u>1,7</u> 16,1	1,8 (1,5–2)	9,5 (8–12)	2
20–25	<u>11,3</u> 22,1	<u>5,5</u> 22,9	4,2 (1–6)	10,7 (5–15)	5
40–50	<u>26,7</u> 39,2	<u>16,5</u> 38,4	4,2 (3–5)	11,4 (9–12)	5
60–65	<u>41,3</u> 53,7	<u>27,3</u> 50,4	5,2 (4,5–6)	13,9 (10–18)	8
80–90	<u>76,8</u> 85,9	<u>63,5</u> 83,4	6,2 (5–7)	11,3 (9–15)	8

Примечание. * Числитель – расчёт по формуле 08.04.2021, знаменатель – по формуле 26.03.2021.

[Note. * Numerator – values calculated from the 08.04.2021 image, denominator – from the 26.03.2021 image].

Снимок от 25.03.2014 использовался в связи с отсутствием безоблачных снимков в ранневесенний период в 2013 г. Дополнительное использование

регрессионного уравнения, рассчитанного по снимку 26.03.2021 г., обусловлено тем, что в 2014 г. был безоблачный снимок, отснятый 25 марта. Различие по толщине снежного покрова на даты 25.03.2014 г. и 26.03.2021 г. оказалось незначительным: в 2014 г. она была на 4 см больше, чем в 2021 г. Из таблицы видно, что рассчитанное проективное покрытие по RED и NIR (модели по снимку 08.04.2021 г.) ниже визуально оцененного проективного покрытия. Особо сильное занижение происходит при расчете по модели NIR. Рассчитанное проективное покрытие березняков по регрессионным уравнениям, построенным с использованием этих каналов по космоснимку от 26.03.2021 г., дает более точные результаты при проективном покрытии от 20% и выше. При проективном покрытии 1–5% есть сильное превышение глазомерных значений. Это может быть связано с большой мозаичностью на начальных стадиях зарастания пашни и несопадением проективного покрытия в геоботанических описаниях и проективным покрытием, рассчитанным для пикселей, размер которых в 9 раз больше размера пробных площадок геоботанических описаний.

Заключение

Использование ранневесенних снимков может быть эффективно для оценки проективного покрытия березняков, произрастающих на заброшенных сельскохозяйственных угодьях. Сравнение регрессионных уравнений, рассчитанных по красному, ближнему и дальним инфракрасным каналам, показало, что наиболее точная оценка проективного покрытия березняков может быть получена с использованием красного канала. Рассчитанные по современным космоснимкам уравнения могут быть использованы для оценки проективного покрытия древостоя по ретроспективным снимкам на более ранних сукцессионных стадиях зарастания заброшенных полей для анализа пространственных закономерностей формирования древостоя. При использовании ранневесенних снимков необходимо учитывать толщину снега, так как в отдельные годы сроки схождения снежного покрова могут сильно варьировать.

Список источников

1. Prishchepov A.V., Radeloff V.C., Dubinin M., Alcantara C. The effect of Landsat ETM/ETM+ image acquisition dates on the detection of agricultural land abandonment in Eastern Europe // *Remote Sensing. Environment*. 2012. Vol. 126. PP. 195–209. doi: 10.1016/j.rse.2012.08.017
2. Lerman Z., Csaki C., Feder G. *Agriculture in transition: land policies and evolving farm structures in post-Soviet Countries*. Lexington Books, Lanham, 2004. 166 p.
3. Rozelle S., Swinnen J.F.M. Success and failure of reform: Insights from the transition of agriculture // *Journal of economic literature*. 2004. Vol. 42, № 2. PP. 404–456. doi: 10.1257/0022051041409048
4. Lioubimtseva E., Henebry G.M. Climate and environmental change in arid Central Asia: Impacts, vulnerability, and adaptations // *Journal of Arid Environments*. 2009. Vol. 73, № 11. PP. 963–977. doi: 10.1016/j.jaridenv.2009.04.022

5. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель в России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М. : ГЕОС. 2010. 416 с.
6. ОМННО «Совет Гринпис». URL: <https://maps.greenpeace.org/maps/aal/> (дата обращения: 28.04.2022).
7. Жижин С.М., Магасумова А.Г. Заращение сельскохозяйственных угодий древесно-кустарниковой растительностью в зоне хвойно-широколиственных лесов Республики Удмуртия // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 2–1 (104). С. 149–153.
8. Stefanski J., Chaskovskyy O., Waske B. Mapping and monitoring of land use changes in post-Soviet western Ukraine using remote sensing data // Applied Geography. 2014. Vol. 55. PP. 155–164. doi: 10.1016/j.apgeog.2014.08.003
9. Valjarevic A., Djekic T., Stevanovic V., Jandzиковic B. GIS numerical and remote sensing analyses of forest changes in the Toplica region for the period of 1953–2013 // Applied geography. 2018. Vol. 92. PP. 131–139. doi: 10.1016/j.apgeog.2018.01.016
10. Kiage L.M., Liu K.B., Walker N.D., Lam N., Huh O.K. Recent land-cover/use change associated with land degradation in the Lake Baringo catchment, Kenya, East Africa: evidence from Landsat TM and ETM+ // International Journal of Remote Sensing. 2007. Vol. 28, № 19. PP. 4285–4309. doi: 10.1080/01431160701241753
11. Hansen M.C., Loveland T.R. A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data // Remote sensing of Environment. 2012. Vol. 122. PP. 66–74. doi: 10.1016/j.rse.2011.08.024
12. Vågen T.G., Winowiecki L.A., Abegaz A., Hadgu K.M. Landsat-based approaches for mapping of land degradation prevalence and soil functional properties in Ethiopia // Remote Sensing of Environment. 2013. Vol. 134. PP. 266–275. doi: 10.1016/j.rse.2013.03.006
13. Eckert S., Husler F., Liniger H., Hodel E. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia // Journal of Arid Environments. 2015. Vol. 113. PP. 16–28. doi: 10.1016/j.jaridenv.2014.09.001
14. Löw F., Fliemann E., Abdullaev I., Conrad C., Lamers J.P. Mapping abandoned agricultural land in Kyzyl-Orda, Kazakhstan using satellite remote sensing // Applied Geography. 2015. Vol. 62. PP. 377–390. doi: 10.1016/j.apgeog.2015.05.009
15. Vinatier F., Arnaiz A.G. Using high-resolution multitemporal imagery to highlight severe land management changes in Mediterranean vineyards // Applied Geography. 2018. Vol. 90. PP. 115–122. doi: 10.1016/j.apgeog.2017.12.003
16. Wulder M.A., White J.C., Goward S.N., Masek J.G., Irons J.R., Herold M., Cohen W.B., Loveland T.R., Woodcock C.E. Landsat continuity: Issues and opportunities for land cover monitoring // Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 112, № 3. PP. 955–969. doi: 10.1016/j.rse.2007.07.004
17. Zhu X., Xiao G., Zhang D., Guo L. Mapping abandoned farmland in China using time series MODIS NDVI // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 755. PP. 142651. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142651
18. Minghua W., Yueming H., Hongmei W., Guangsheng L., Liying Y. Remote sensing extraction and feature analysis of abandoned farmland in hilly and mountainous areas: A case study of Xingning, Guangdong // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2020. Vol. 20. PP. 100403. doi: 10.1016/j.rsase.2020.100403
19. Королева Н.В., Тихонова Е.В., Ершов Д.В., Салтыков А.Н., Гаврилюк Е.А., Пугачевский А.В. Оценка масштабов зарастания нелесных земель в Национальном парке «Смоленское Поозерье» за 25 лет по спутниковым данным Landsat // Лесоведение. 2018. № 2. С. 83–96. doi: 10.7868/S0024114818020018
20. Fraser R.H., Li Z., Landry R. SPOT Vegetation for characterizing boreal forest fires // International Journal of Remote Sensing. 2000. Vol. 21, № 18. PP. 3525–3532. doi: 10.1080/014311600750037534

21. Marsett R.C., Qi J., Heilman P., Bienenbender S.H., Watson M.C., Amer S., Weltz M., Goodrich D., Marsett R. Remote sensing for grassland management in the arid southwest // *Rangeland Ecology and Management*. 2006. Vol. 59. № 5. PP. 530–540. doi: 10.2111/05-201R.1
22. Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Levers C., Prishchepov A., Hostert P. Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series // *Remote Sensing of Environment*. 2015. Vol. 163. PP. 312–325. doi: 10.1016/j.rse.2015.03.028
23. Медведев А.А., Тельнова Н.О., Кудиков А.В. Дистанционный высокодетальный мониторинг динамики зарастания заброшенных сельскохозяйственных земель лесной растительностью // *Вопросы лесной науки*. 2019. Т. 2, № 3. С. 3.
24. Li Y., Shan Y., Chen Y. Analysis of farmland abandonment and government supervision traps in China // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18. PP. 1–27. doi: 10.3390/ijerph18041815
25. Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Kuzyakov Y. Carbon pool and sequestration in former arable Chernozems depending on restoration period // *Ekologija*. 2008. Vol. 54, № 4. PP. 232–238.
26. Kalinina O., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Najdenko L., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic sandy soils in the southern Taiga of Russia: soil development, nutrient status, and carbon dynamics // *Geoderma*. 2009. Vol. 152, № 1–2. PP. 35–42. doi: 10.1016/j.geoderma.2009.05.014
27. Kurganova I.N., Kuderyarov V.N., Gerenyu L.D. Updated estimate of carbon balance on Russian territory // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. 2010. Vol. 62, № 5. PP. 497–505. doi: 10.1111/j.1600-0889.2010.00467.x
28. Kalinina O., Krause S.-E., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic chernozems of Russia: Soil development, carbon stocks, and dynamics of carbon pools // *Geoderma*. 2011. Vol. 162, № 1–2. PP. 196–206. doi: 10.1016/j.geoderma.2011.02.005
29. Kalinina O., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Giani L. Chronosequential development of post-agrogenic soils of different climatic zones in Russia under self-restoration // *Catena*. 2015. Vol. 129. PP. 18–29. doi: 10.1016/j.catena.2015.02.016
30. Kalinina O., Chertov O., Frolov P., Goryachkin S., Kuner P., Kuper J., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Lyuri D., Rusalov A., Kuzyakov Y., Giani L. Alteration process during the post-agricultural restoration of Luvisols of the temperate broad-leaved forest in Russia // *Catena*. 2018. Vol. 171. PP. 602–612. doi: 10.1016/j.catena.2018.08.004
31. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Ипп С.Л., Каганов В.В., Хорошаев Д.А., Рухович Д.И., Сумин Ю.В., Дурманов Н.Д., Кузяков Я.В. Пилотный карбоновый полигон в России: анализ состояния почв и запасы углерода в лесной растительности // *Почвы и окружающая среда*. 2022. Т. 5, № 2. С. Е169–е169. doi: 10.31251/pos.v5i2.169
32. Сочилова Е.Н., Ершов Д.В. Анализ возможности определения запасов древесных пород по спутниковым данным Landsat ETM+ // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9, № 3. С. 277–282.
33. Ершов Д.В., Сочилова Е.Н., Королева Н.В. Оценка запасов древесины лесных пород по спутниковым изображениям высокого и детального пространственного разрешения (на примере лесов Ханты-Мансийского АО) // *Сохранение лесных экосистем: проблемы и пути их решения : материалы II Международной научно-практической конференции*. 2019. С. 90–93.
34. Wang X.Y., Wang J., Jiang Z.Y., Li H.Y., Hao X.H. An effective method for snow-cover mapping of dense coniferous forests in the Upper Heihe River Basin using Landsat Operational Land Imager data // *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7, № 12. PP. 17246–17257. doi: 10.3390/rs71215882
35. QGIS development team. QGIS geographic information system. Open source geospatial foundation project. 2022. URL: <http://qgis.osgeo.org> (дата обращения: 28.04.2022).

36. USGS earth explorer. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 28.04.2022).
37. Statgraphics Technologies. Statgraphics 19 centurion. Software. 2020. URL: <https://www.statgraphics.com/> (дата обращения: 28.04.2022).
38. ООО «Расписание погоды». URL: <https://rp5.ru/> (дата обращения: 28.04.2022).
39. Клешнин А.Ф. Растение и свет: теория и практика светокультуры растений. М. : Изд-во АН СССР, 1954. 460 с.
40. Как рассчитать количество солнечной энергии в регионе. URL: <https://www.beta-energy.ru/insolation/>
41. Туктамышев И.Р., Широких П.С., Муллагулов Р.Ю. Об информативности спектральных каналов и NDVI спутника ДЗЗ Landsat 5 TM Landsat 7 ETM+ для оценки стадий зарастания леса заброшенных сельскохозяйственных территорий // Экобиотех. 2021. doi: 10.31163/2618-964X-2021-4-3-178-185

References

1. Prishchepov AV, Radeloff VC, Dubinin M, Alcantara C. The effect of Landsat ETM/ETM+ image acquisition dates on the detection of agricultural land abandonment in Eastern Europe // *Remote Sensing Environment*. 2012;126:195-209. doi: 10.1016/j.rse.2012.08.017
2. Lerman Z, Csaki C, Feder G. Agriculture in transition: land policies and evolving farm structures in post-Soviet Countries. Lanham: Lexington Books.; 2004. 166 p.
3. Rozelle S, Swinnen JFM. Success and failure of reform: Insights from the transition of agriculture // *Journal of economic literature*. 2004;42(2):404-456. doi: 10.1257/0022051041409048
4. Lioubimtseva E, Henebry GM. Climate and environmental change in arid Central Asia: Impacts, vulnerability, and adaptations // *Journal of Arid Environments*. 2009;73(11):963-977. doi: 10.1016/j.jaridenv.2009.04.022
5. Lyuri DI, Goryachkin SV, Karavaeva NA, Denisenko EA, Nefedova TG. Dinamika sel'skokhozyaystvennykh zemel' v Rossii v XX veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochv. Moscow: GEOS Publ.; 2010. 416 p.
6. OMNNO "Sovet Grinpis" [Electronic resource]. Available at: <https://maps.greenpeace.org/maps/aal/> (accessed 28.04.2022).
7. Zhizhin SM, Magasumova AG. Zarastanie sel'skokhozyaystvennykh ugodiy drevesno-kustarnikovoy rastitel'nost'yu v zone khvoyno-shirokolistvennykh lesov Respubliki Udmurtiya // *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2021;2(104):149-153. In Russian
8. Stefanski J, Chaskovskyy O, Waske B. Mapping and monitoring of land use changes in post-Soviet western Ukraine using remote sensing data // *Applied Geography*. 2014;55:155-164. doi: 10.1016/j.apgeog.2014.08.003
9. Valjarevic A, Djekic T, Stevanovic V, Jandzovic B. GIS numerical and remote sensing analyses of forest changes in the Toplica region for the period of 1953-2013 // *Applied geography*. 2018;92:131-139. doi: 10.1016/j.apgeog.2018.01.016
10. Kiage LM, Liu KB, Walker ND, Lam N, Huh OK. Recent land-cover/use change associated with land degradation in the Lake Baringo catchment, Kenya, East Africa: evidence from Landsat TM and ETM+ // *International Journal of Remote Sensing*. 2007;28(19):4285-4309. doi: 10.1080/01431160701241753
11. Hansen MC, Loveland TR. A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data // *Remote sensing of Environment*. 2012;122:66-74. doi: 10.1016/j.rse.2011.08.024
12. Vågen TG, Winowiecki LA, Abegaz A, Hadgu KM. Landsat-based approaches for mapping of land degradation prevalence and soil functional properties in Ethiopia // *Remote Sensing of Environment*. 2013;134:266-275. doi: 10.1016/j.rse.2013.03.006

13. Eckert S, Husler F, Liniger H, Hodel E. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia // *Journal of Arid Environments*. 2015;113:16-28. doi: 10.1016/j.jaridenv.2014.09.001
14. Löw F, Fliemann E, Abdullaev I, Conrad C, Lamers JP. Mapping abandoned agricultural land in Kyzyl-Orda, Kazakhstan using satellite remote sensing // *Applied Geography*. 2015;62:377-390. doi: 10.1016/j.apgeog.2015.05.009
15. Vinatier F, Arnaiz AG. Using high-resolution multitemporal imagery to highlight severe land management changes in Mediterranean vineyards // *Applied Geography*. 2018;90:115-122. doi: 10.1016/j.apgeog.2017.12.003
16. Wulder MA, White JC, Goward SN, Masek JG, Irons JR, Herold M, Cohen WB, Loveland TR, Woodcock CE. Landsat continuity: Issues and opportunities for land cover monitoring // *Remote Sensing of Environment*. 2008;112(3):955-969. doi: 10.1016/j.rse.2007.07.004
17. Zhu X, Xiao G, Zhang D, Guo L. Mapping abandoned farmland in China using time series MODIS NDVI // *Science of The Total Environment*. 2021;755:142651. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142651
18. Minghua W, Yueming H, Hongmei W, Guangsheng L, Liying Y. Remote sensing extraction and feature analysis of abandoned farmland in hilly and mountainous areas: A case study of Xingning, Guangdong // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2020;20:100403. doi: 10.1016/j.rsase.2020.100403
19. Koroleva NV, Tikhonova EV, Ershov DV, Saltykov AN, Gavriluk EA, Pugachevskiy AV. Otsenka masshtabov zarastaniya nelesnykh zemel' v Natsional'nom parke Smolenskoe Poozer'e za 25 let po sputnikovym dannym Landsat // *Lesovedenie*. 2018;2:83-96. doi: 10.7868/S0024114818020018 In Russian
20. Fraser RH, Li Z, Landry R. SPOT Vegetation for characterizing boreal forest fires // *International Journal of Remote Sensing*. 2000;21(18):3525-3532. doi: 10.1080/014311600750037534
21. Marsett RC, Qi J, Heilman P, Bienenbender SH, Watson MC, Amer S, Weltz M, Goodrich D, Marsett R. Remote sensing for grassland management in the arid southwest // *Rangeland Ecology and Management*. 2006;59(5):530-540. doi: 10.2111/05-201R.1
22. Estel S, Kuemmerle T, Alcántara C, Levers C, Prishchepov A, Hostert P. Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series // *Remote Sensing of Environment*. 2015;163:312-325. doi: 10.1016/j.rse.2015.03.028
23. Medvedev AA, Tel'nova NO, Kudikov AV. Distantionnyy vysokodetal'nyy monitoring dinamiki zarastaniya zabroshennykh sel'skokhozyaystvennykh zemel' lesnoy rastitel'nost'yu // *Voprosy lesnoy nauki*. 2019;2(3):3-3. In Russian
24. Li Y, Shan Y, Chen Y. Analysis of farmland abandonment and government supervision traps in China // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18:1-27. doi: 10.3390/ijerph18041815
25. Lopes de Gerenyu VO, Kurganova IN, Kuzyakov Y. Carbon pool and sequestration in former arable Chernozems depending on restoration period // *Ekologiya*. 2008;54(4):232-238.
26. Kalinina O, Goryachkin SV, Karavaeva NA, Lyuri DI, Najdenko L, Giani L. Self-restoration of post-agrogenic sandy soils in the southern Taiga of Russia: soil development, nutrient status, and carbon dynamics // *Geoderma*. 2009;152(1-2):35-42. doi: 10.1016/j.geoderma.2009.05.014
27. Kurganova IN, Kudeyarov VN, Gerenyu LD. Updated estimate of carbon balance on Russian territory // *Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology*. 2010;62(5):497-505. doi: 10.1111/j.1600-0889.2010.00467.x
28. Kalinina O, Krause S-E, Goryachkin SV, Karavaeva NA, Lyuri DI, Giani L. Self-restoration of post-agrogenic chernozems of Russia: Soil development, carbon stocks, and dynamics of carbon pools // *Geoderma*. 2011;162(1-2):196-206. doi: 10.1016/j.geoderma.2011.02.005

29. Kalinina O, Goryachkin SV, Lyuri DI, Giani L. Chronosequential development of post-agrogenic soils of different climatic zones in Russia under self-restoration // *Catena*. 2015;129:18-29. doi: 10.1016/j.catena.2015.02.016
30. Kalinina O, Chertov O, Frolov P, Goryachkin S, Kuner P, Kuper J, Kurganova I, Lopes de Gerenyu V, Lyuri D, Rusalov A, Kuzyakov Y, Giani L. Alteration process during the post-agricultural restoration of Luvisols of the temperate broad-leaved forest in Russia // *Catena*. 2018;171:602-612. doi: 10.1016/j.catena.2018.08.004
31. Kurganova IN, Lopes de Gerenyu VO, Ipp SL, Kaganov VV, Khoroshaev DA, Rukhovich DI, Sumin YuV, Durmanov ND, Kuzyakov YaV. Pilotnyy karbonovyy poligon v Rossii: analiz sostoyaniya pochv i zapasy ugleroda v lesnoy rastitel'nosti // *Pochvy i okruzhayushchaya sreda*. 2022;5(2):E169-e169. doi: 10.31251/pos.v5i2.169 In Russian
32. Sochilova EN, Ershov DV. Analiz vozmozhnosti opredeleniya zapasov drevesnykh porod po sputnikovym dannym Landsat ETM+ // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2012;9(3):277-282. In Russian
33. Ershov DV, Sochilova EN, Koroleva NV. Otsenka zapasov drevesiny lesnykh porod po sputnikovym izobrazheniyam vysokogo i detal'nogo prostranstvennogo razresheniya (na primere lesov Khanty-Mansiyskogo AO) // *v sbornike: sokhraneniye lesnykh ekosistem: problemy i puti ikh resheniya. Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Moscow: Tsentr po problemam ekologii i produktivnosti lesov RAN Publ. 2019;90-93. In Russian
34. Wang XY, Wang J, Jiang ZY, Li HY, Hao XH. An effective method for snow-cover mapping of dense coniferous forests in the Upper Heihe River Basin using Landsat Operational Land Imager data // *Remote Sensing*. 2015;7(12):17246-17257. doi: 10.3390/rs71215882
35. QGIS development team. QGIS geographic information system. Open source geospatial foundation project. 2022. Available at: <http://qgis.osgeo.org> (accessed 28.04.2022).
36. USGS earth explorer [Electronic resource]. Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 28.04.2022).
37. Statgraphics Technologies. Statgraphics 19 centurion. Software. 2020. Available at: <https://www.statgraphics.com/> (accessed 28.04.2022).
38. ООО "Raspisanie Pogody" [Electronic resource]. Available at: <https://rp5.ru/> . (accessed 28.04.2022).
39. Kleshnin AF, Plant and light: theory and practice of plant light culture. M.: Izd-vo AN SSSR, 1954;460. (In Russ.).
40. Kak raschitat' kolichestvo solnechnoy energii v regione <https://www.betaenergy.ru/insolation/>
41. Tuktamyshev IR, Shirokikh PS, Mullagulov RYu. Ob informativnosti spektral'nykh kanalov i NDVI sputnika DZZ Landsat 5 TM Landsat 7 ETM+ dlya otsenki stadiy zarastaniya lesa zabroshennykh sel'skokhozyaystvennykh territoriy // *Ecobiotech*. 2021. 10.31163/2618-964X-2021-4-3-178-185 In Russian

Информация об авторах:

Федоров Николай Иванович – д-р биол. наук, доцент, зав. лаборатории геоботаники и растительных ресурсов Уфимского института биологии УФИЦ РАН (Уфа, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0167-7449>

E-mail: fedorov@anrb.ru

Туктамышев Ильшат Ринатович – аспирант, м.н.с. лаборатории геоботаники и растительных ресурсов Уфимского института биологии УФИЦ РАН (Уфа, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5923-3349>

E-mail: ishatik@yandex.ru

Широких Павел Сергеевич – канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории геоботаники и растительных ресурсов Уфимского института биологии УФИЦ РАН (Уфа, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1864-4878>

E-mail: shirpa@mail.ru

Мартыненко Василий Борисович – д-р биол. наук, профессор, г.н.с. лаборатории геоботаники и растительных ресурсов Уфимского института биологии УФИЦ РАН (Уфа, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9071-3789>

E-mail: vb-mart@mail.ru

Наумова Лениза Гумеровна – канд. биол. наук, профессор кафедры биоэкологии и биологического образования Башкирского государственного педагогического университета им. Акмиллы (Уфа, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7776-0786>

Email: leniza.gumerovna@yandex.ru

Information about the authors:

Nikolay I. Fedorov, Dr. Sci. (Biol.), Docent, Chief of Laboratory of Geobotany and Plant Resources of the Ufa Institute of Biology, Ufa Federal Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (Ufa, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0167-7449>

E-mail: fedorov@anrb.ru

Ishat R. Tuktamyshev, Aspirant, Junior researcher, Laboratory of Geobotany and Plant Resources of the Ufa Institute of Biology, Ufa Federal Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (Ufa, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5923-3349>

E-mail: ishatik@yandex.ru

Pavel S. Shirokikh, Cand. Sci. (Biol.), Senior researcher, Laboratory of Geobotany and Plant Resources of the Ufa Institute of Biology, Ufa Federal Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (Ufa, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1864-4878>

E-mail: shirpa@mail.ru

Vasiliy B. Martynenko, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Major researcher, Laboratory of Geobotany and Plant Resources, Ufa Institute of Biology, Ufa Federal Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (Ufa, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9071-3789>

E-mail: vb-mart@mail.ru

Leniza G. Naumova, Cand. Sci. (Biol.), Professor, Departments of Bioecology and Biological Education of Bashkir State Pedagogical University n.a. M. Akmulla, 3-a Oktyabrskoy revolyutsii street (Ufa, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7776-0786>

E-mail: leniza.gumerovna@yandex.ru

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 03.08.2022;
одобрена после рецензирования 08.11.2022; принята к публикации 29.12.2022.*

*The article was submitted 03.08.2022;
approved after reviewing 08.11.2022; accepted for publication 29.12.2022.*