

УДК: 528.7

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-418-431

А.О. Полетаев¹

МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ИЗУЧЕНИИ ПРОЕКТИВНОГО ПОКРЫТИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ЗАЛЕЖНЫХ ЗЕМЕЛЬ

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены методы изучения проективного покрытия растительности (FVC). Исследована возможность использования для этой задачи снимков со спутника Sentinel-2 и описана методика получения растра проективного покрытия растительности.

Представлены фрагменты классифицированных растров, созданных путем интерполяции точек, полученных из растров проективного покрытия растительности на территорию изучения за 2018–2020 гг. Показана динамика показателя FVC за 2018–2020 гг., определено варьирование максимальных, средних и минимальных величин за указанный период. Проведено сопоставление максимальных, минимальных и средних значений проективного покрытия растительности с величинами сумм осадков по данным архива погоды за периоды между использованными спутниковыми снимками. Проведен корреляционный анализ между значениями показателя FVC (максимальными, средними, минимальными) и суммами осадков, показавший слабую взаимосвязь между данными величинами. Рассчитаны суммы значений среднесуточной испаряемости за периоды между использованными спутниковыми снимками, определены значения баланса между суммами осадков и суммами значений среднесуточной испаряемости. Сопоставлены графики изменения баланса между суммами осадков и суммами значений среднесуточной испаряемости с графиками изменения FVC максимального, минимального и среднего. Выявлено, что максимальные значения баланса предшествуют во времени максимальным значениям FVC и минимальные значения баланса совпадают во времени с минимальными значениями FVC или предшествуют им. Показан пример пространственной взаимосвязи между повышенными, по сравнению с окружающим фоном, значениями FVC растра проективного покрытия растительности и курганами, выделенными по карте высот, полученной с помощью БПЛА.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: проективное покрытие растительности, залежные земли, Sentinel-2, среднесуточная испаряемость

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

Arseniy O. Poletaev¹

REMOTE SENSING METHODS IN THE STUDY OF FRACTIONAL VEGETATION COVER OF FALLOW LANDS

ABSTRACT

The article discusses methods for studying fractional vegetation cover (FVC). The possibility of using satellite images from the Sentinel-2 satellite to study the fractional vegetation cover has been studied and the method for obtaining a raster of the fractional vegetation cover has been described. Fragments of classified rasters created by interpolation of points obtained from rasters of fractional vegetation cover to the study area for 2018–2020 are presented. The dynamics of the FVC indicator for 2018–2020 is shown, the variation of the maximum, average and minimum values for the specified period is determined. The comparison of the maximum, minimum and average values of the projective vegetation cover with the values of precipitation amounts according to the weather archive data for the periods between the used satellite images is carried out. A correlation analysis was carried out between the values of the FVC indicator (maximum, average, minimum) and the amount of precipitation, which showed a weak relationship between these values. The sums of the values of the average daily evaporation for the periods between the used satellite images were calculated, the values of the balance between the sums of precipitation and the sums of the values of the average daily evaporation were determined. The graphs of changes in the balance between the amounts of precipitation and the sums of the values of the average daily evaporation were compared with the graphs of changes in the FVC of the maximum, minimum and average. It was revealed that the maximum balance values precede in time the maximum FVC values, and the minimum balance values coincide in time with the minimum FVC values, or precede them. An example of the spatial relationship between the increased, in comparison with the surrounding background, the FVC values of the raster of the projective vegetation cover and mounds, highlighted by the elevation map obtained using the UAV, is shown.

KEYWORDS: fractional vegetation cover, fallow lands, Sentinel-2, average daily evaporation

ВВЕДЕНИЕ

Проективное покрытие растительности (fractional vegetation cover – FVC) является показателем обилия, который определяет относительную площадь горизонтальной проекции отдельных видов или их групп, ярусов и т.д. фитоценоза на поверхность почвы. Проективное покрытие растительности является важным показателем для определения состояния растительности на поверхности земли и необходимым параметром для многих моделей, применяемых для мониторинга изменения климата, прогноза погоды, оценки опустынивания, мониторинга эрозии почвы, гидрологического моделирования и мониторинга засухи. Точная и своевременная оценка FVC в глобальном и региональном масштабах имеет большое значение для мониторинга глобальных изменений, экологического мониторинга, мониторинга роста сельскохозяйственных культур и исследования стихийных бедствий [Wang et al., 2018]. Величина проективного покрытия растительности является переменной и испытывает существенное колебание в процессе вегетации. Выражается проективное покрытие как отношение проекции побегов и листьев к общей площади участка [Терехин, 2019]. Оценка проективного покрытия растительности проводится с помощью различных методов. Традиционными являются

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

методы наземного мониторинга: точечный, линейный, площадной. К наземным методам относится также оценка по цифровым изображениям виртуальных и реальных учетных площадок (фотоплощадок) [Бузук, Созинов, 2014]. Для оценки проективного покрытия растительности больших площадей целесообразно учитывать информацию спутниковых снимков различных пространственных разрешений (MODIS, Sentinel-2 и т.д.). Среди методов, касающихся работы с такими снимками, наиболее популярными являются методы, связанные с использованием вегетационных индексов [Kim et al., 2020; Gao et al., 2020], анализом спектральных смесей [Vermeulen, 2021]. Для изучения проективного покрытия растительности небольших площадей в последнее время большой потенциал представляют БПЛА, в особенности при использовании мультиспектральных [Melville et al., 2019] и гиперспектральных [Sankey et al., 2018] снимков.

Залежные земли обладают потенциалом сохранения биоразнообразия степной растительности [Шевченко и др., 2013]. В конечном счете, сохранение и увеличение биоразнообразия необходимо при формировании органических агроэкосистем [Николаева и др., 2011]. При этом залежные земли испытывают негативное влияние от антропогенной деятельности, которое выражается, например, в аккумуляции тяжелых металлов [Lisetskii et al., 2020]. Поэтому, в связи с активной цифровизацией сельского хозяйства, становится необходимым учет биоразнообразия залежных земель, изучение их проективного покрытия растительности.

Целью данного исследования являлось изучение особенностей проективного покрытия растительности залежных земель на примере разновременных залежей возле античного поселения Тюмень II. Залежные земли на данной территории являются постагрогенными, нового времени, а ядром системы землепользования является система размежевания земель для античного полеводства в IV–II вв. до н.э. [Lisetskii et al., 2014].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для расчета проективного покрытия растительности использовался ряд спутниковых снимков Sentinel-2, загруженных с интернет-ресурса Геологической службы США¹. Спутники Sentinel-2 (включая S2A и S2B) составляют оптическую миссию высокого разрешения Европейского космического агентства (ESA) для программы Copernicus. Многоспектральные инструменты (MSI), установленные на двух спутниках, предоставляют данные с тремя различными пространственными разрешениями, высоким временным разрешением и широким спектральным покрытием в 13 диапазонах от видимого (VIS) и ближнего инфракрасного (NIR) до коротковолнового инфракрасного (SWIR) [Wang et al., 2018]. В ходе работы использовались спутниковые снимки Sentinel-2 уровня обработки L1C за период с января 2018 по декабрь 2020 гг., всего 36 снимков, по 1 снимку за 1 месяц, с отсутствием облачности над исследуемой территорией. Для обработки спутниковых снимков использовалось ПО Snap. Для предварительной обработки снимков использовался процессор Sen2Cor. Он предназначен для коррекции нижней части атмосферы, в результате которой спутниковые снимки Sentinel-2 приобретают уровень обработки, соответствующий уровню L2A. После этого проведен ресамплинг (передискретизация) спутниковых снимков для того, чтобы все каналы каждого снимка имели одинаковое разрешение (используется инструмент Resampling). В данном исследовании величина пространственного разрешения (размер пиксела) была установлена на уровне 20 м. В результате предварительной обработки спутниковых снимков стало возможным их использование для вычисления проективного покрытия растительности. Это вычисление проведено с помощью инструмента расчета биофизических параметров Biophysical Processor, который создает растр проективного покрытия растительности. Значение пикселов в растре варьируется от 0 до 1.

¹ EarthExplorer. Электронный ресурс: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 01.03.2021)

Растры проективного покрытия растительности были обрезаны по области, на которую был получен ортофотоплан в ходе обработки ортофотоснимков с БПЛА DJI Mavic Pro (съемки проводились 26.09.2020) (рис. 1). Данная территория расположена вблизи античного поселения Тюмень II, датируемого IV в. до н.э. [Смекалова, 2010; Смекалова и др., 2016].

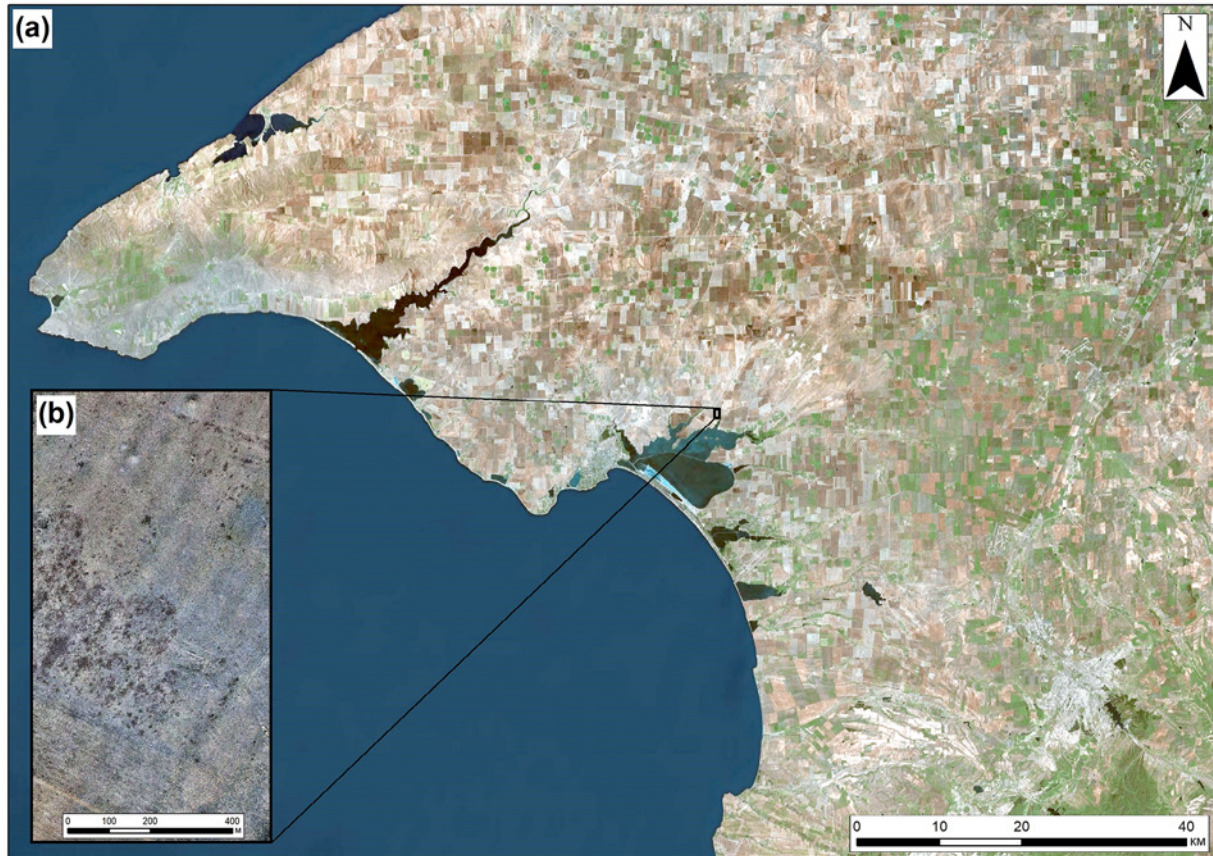


Рис. 1. Северо-Западный Крым (a) и территория исследования (фрагмент ортофотоплана) (b)

Fig. 1. Northwestern Crimea (a) and the study area (fragment of the orthophotomap) (b)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Растры проективного покрытия на территорию исследования были сконвертированы в точки с целью проведения интерполяции по методу обратного взвешенного расстояния (ОВР) с использованием ПО ArcGIS. Растры, полученные с помощью интерполяции, были классифицированы. В результате были получены картограммы проективного покрытия (рис. 2–4).

Пространственно-временная неоднородность проективного покрытия растительности внутри территории исследования обусловлена наличием ряда факторов. К ним относятся, например, мозаичность почвенного покрова, неоднородность рельефа, погодные условия. Была предпринята попытка установить взаимосвязь между значениями проективного покрытия растительности и суммами осадков за определенные периоды между датами получения спутниковых снимков Sentinel-2. Для этого с интернет-ресурса «Погода и климат»¹ был скачан архив погоды за 2018–2020 гг. ближайшей метеостанции, расположенной в г. Евпатория, в 15 км к ЮЗ от территории исследования.

¹ Архив погоды в Евпатории. Электронный ресурс: <http://pogodaiklimat.ru/weather.php?id=33929> (дата обращения 01.03.2021)

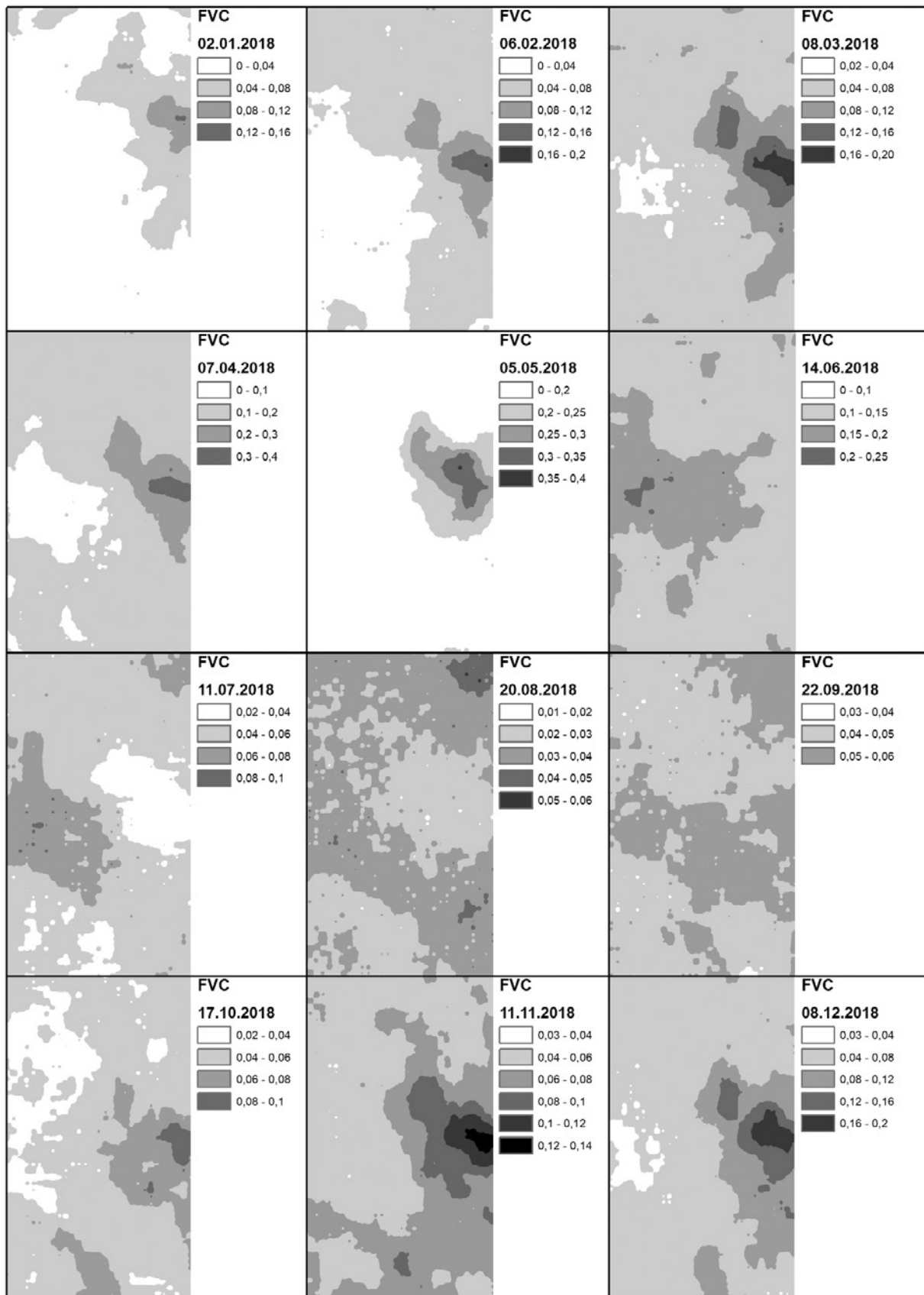


Рис. 2. Изменение проективного покрытия растительности на территории разновременных залежей в районе античного поселения Тюмень II в 2018 г.

Fig. 2. Changes in the fractional vegetation cover on the territory of fallow lands of different times near the ancient settlement of Tyumen II in 2018

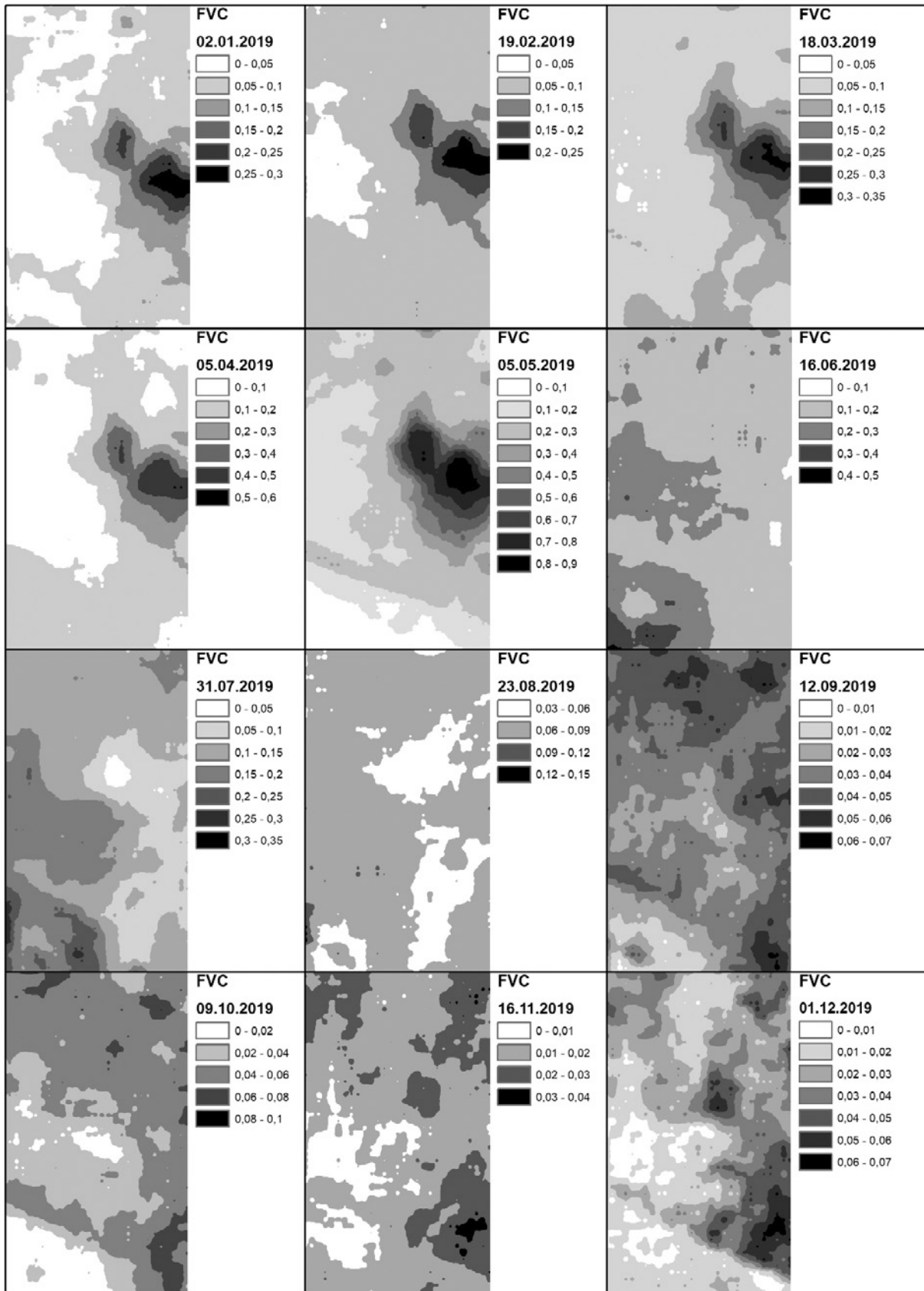


Рис. 3. Изменение проективного покрытия растительности на территории разновременных залежей в районе античного поселения Тюмень II в 2019 г.

Fig. 3. Changes in the fractional vegetation cover on the territory of fallow lands of different times near the ancient settlement of Tyumen II in 2019

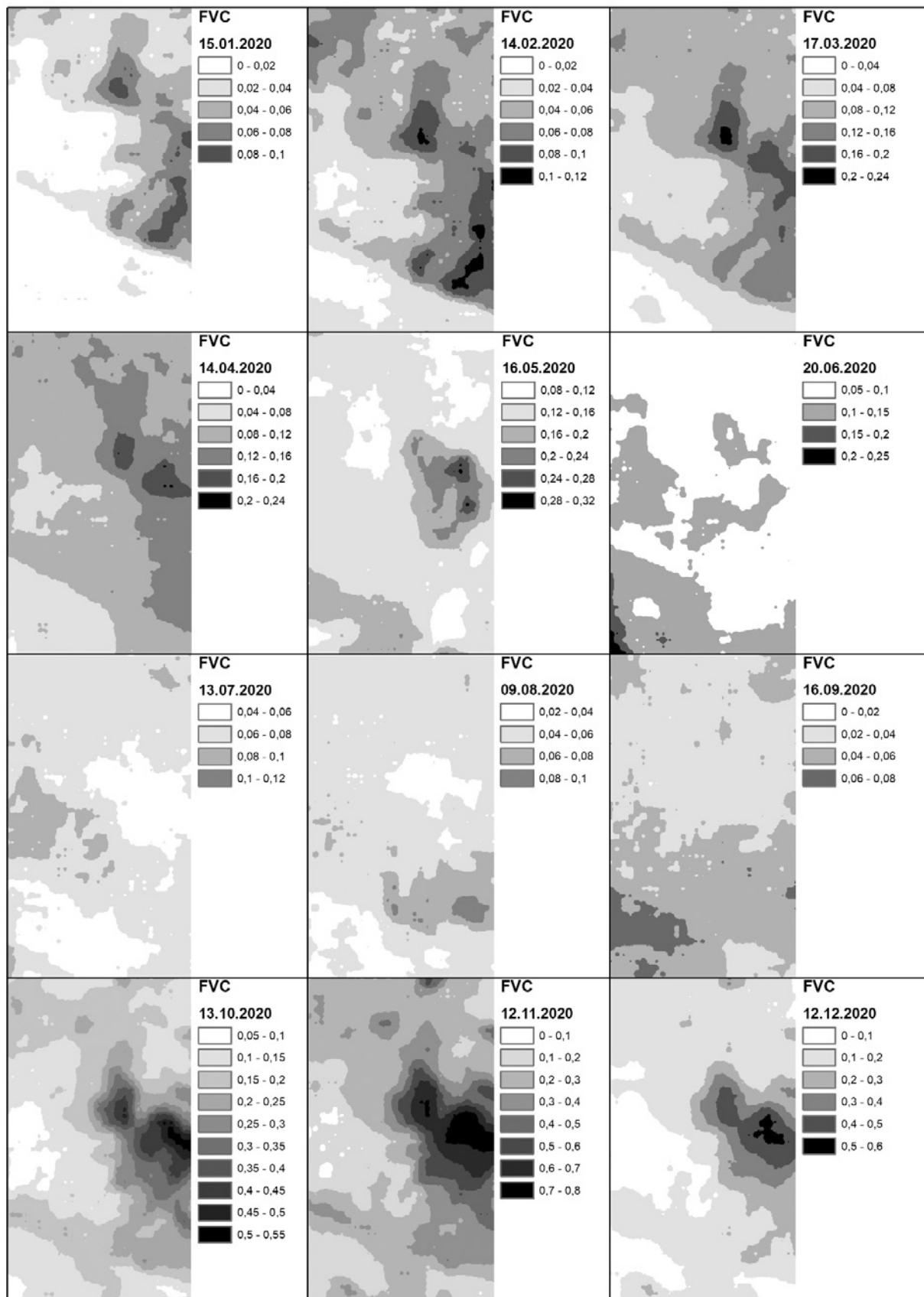


Рис. 4. Изменение проективного покрытия растительности на территории разновременных залежей в районе античного поселения Тюмень II в 2020 г.

Fig. 4. Changes in the fractional vegetation cover on the territory of fallow lands of different times near the ancient settlement of Tyumen II in 2020

В табл. 1 даны максимальные, минимальные и средние значения проективного покрытия растительности (FVC), определенные в ПО ArcGIS для 36 растров проективного покрытия растительности территории исследования и суммы осадков (в мм) за предыдущий период между датами съемки.

Табл. 1. Значения проективного покрытия растительности (FVC), рассчитанного внутри территории исследования и сумма осадков за предыдущий период между датами съемки
Table 1. Fractional vegetation cover (FVC) values calculated within the study area and the amount of precipitation for the previous period between survey dates

Дата съемки со спутника Sentinel-2	Сумма осадков за предыдущий период, мм	Максимальное значение FVC на дату съемки	Минимальное значение FVC на дату съемки	Среднее значение FVC на дату съемки
02.01.2018	–	0.135453	0	0.029708
06.02.2018	40.6	0.170567	0.015805	0.049878
08.03.2018	48.4	0.201118	0.02254	0.068207
07.04.2018	17.7	0.360438	0.059809	0.136005
05.05.2018	0.9	0.358302	0.125937	0.1737
14.06.2018	21.8	0.218704	0.096307	0.140567
11.07.2018	25.2	0.089883	0.020207	0.050234
20.08.2018	9.6	0.052083	0.015693	0.031119
22.09.2018	44.3	0.076561	0.035656	0.049251
17.10.2018	20.1	0.099163	0.02782	0.049312
11.11.2018	27	0.131595	0.035995	0.062251
08.12.2018	28	0.19239	0.030907	0.068725
02.01.2019	72.7	0.299815	0.003758	0.069471
19.02.2019	39.9	0.246332	0.02961	0.075349
18.03.2019	32	0.322814	0.038584	0.100647
05.04.2019	1.7	0.509482	0.034652	0.132271
05.05.2019	33.1	0.882	0.035761	0.256396
16.06.2019	86.3	0.420435	0.085862	0.184452
31.07.2019	83.8	0.336077	0.031902	0.134303
23.08.2019	3.2	0.141149	0.032318	0.067398
12.09.2019	0.5	0.06623	0.005819	0.036146
09.10.2019	24.1	0.080507	0	0.039225
16.11.2019	8.4	0.037359	0	0.016573
01.12.2019	29.6	0.068425	0	0.024561
15.01.2020	45.9	0.105986	0	0.030122
14.02.2020	36.4	0.128407	0	0.048228
17.03.2020	7.5	0.22785	0	0.090197
14.04.2020	0.7	0.208856	0.032815	0.102718
16.05.2020	20.1	0.298356	0.08263	0.14275
20.06.2020	42	0.223495	0.050552	0.09494
13.07.2020	12	0.112807	0.045444	0.066205
09.08.2020	7.2	0.09854	0.024779	0.048627

16.09.2020	15.2	0.075567	0.01618	0.041019
13.10.2020	97.6	0.536108	0.057424	0.178459
12.11.2020	29.6	0.797125	0.041794	0.288321
12.12.2020	6.2	0.538861	0.019895	0.166120

Динамика рассчитанного проективного покрытия растительности внутри территории исследования в течение 2018–2020 гг. (рис. 5) показала, что наибольшие максимальные значения показателя FVC наблюдались 05.05.2019 и 12.11.2020 и составили 0,88 и 0,79 соответственно. Максимальные значения показателя FVC варьируют в пределах от 0,04 до 0,88. Средние значения показателя FVC варьируют в пределах от 0,02 до 0,28. Минимальные значения показателя FVC варьируют в пределах от 0 до 0,13.

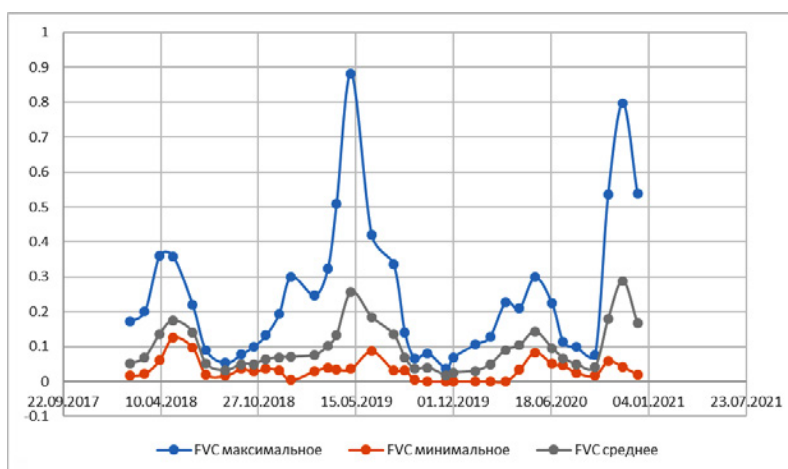


Рис. 5. Динамика проективного покрытия растительности (FVC) на территории исследования за 2018–2020 гг.

Fig. 5. Dynamics of fractional vegetation cover (FVC) in the study area for 2018–2020

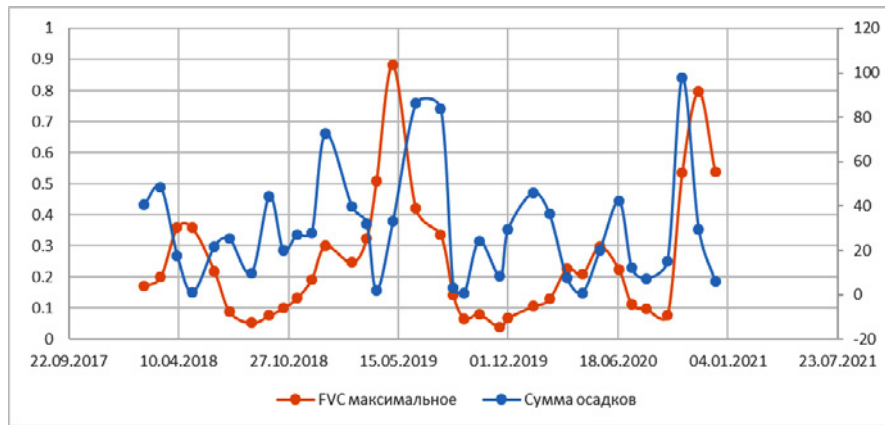
На основании табл. 1 были вычислены значения коэффициента корреляции между суммами осадков и величинами проективного покрытия (максимальными, минимальными, средними) (табл. 2).

Табл. 2. Значения коэффициента корреляции между величинами проективного покрытия растительности, вычисленных при использовании спутниковых снимков Sentinel-2 и суммами осадков за периоды между использованными спутниковыми снимками за 2018–2020 гг.

Table 2. The values of the correlation coefficient between the fractional vegetation cover values calculated using Sentinel-2 satellite images and the amount of precipitation for the periods between the satellite images used for 2018–2020

	Сумма осадков, 2018 г.	Сумма осадков, 2019 г.	Сумма осадков, 2020 г.
FVC максимальное	0.008465	0.294052	0.419653
FVC минимальное	-0.605688	0.5663	0.12867
FVC среднее	-0.399679	0.485612	0.293445

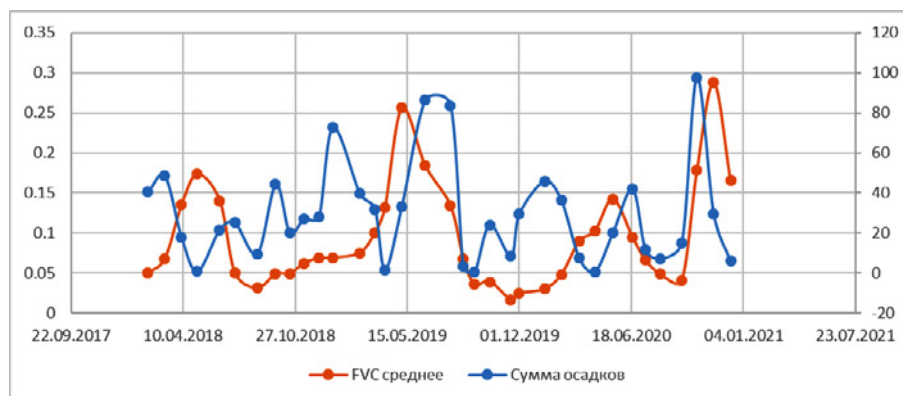
Из табл. 2 следует, что взаимосвязь между суммами осадков и значениями проективного покрытия растительности является слабой (визуализация в виде графиков представлена на рис. 6), и здесь оказывают влияние на рост проективного покрытия растительности другие факторы.



(a)



(b)



(c)

Рис. 6. Графики изменения суммы осадков и FVC максимального (a), минимального (b) и среднего (c)

Fig. 6. Graphs of changes in the amount of precipitation and FVC maximum (a), minimum (b) and average (c)

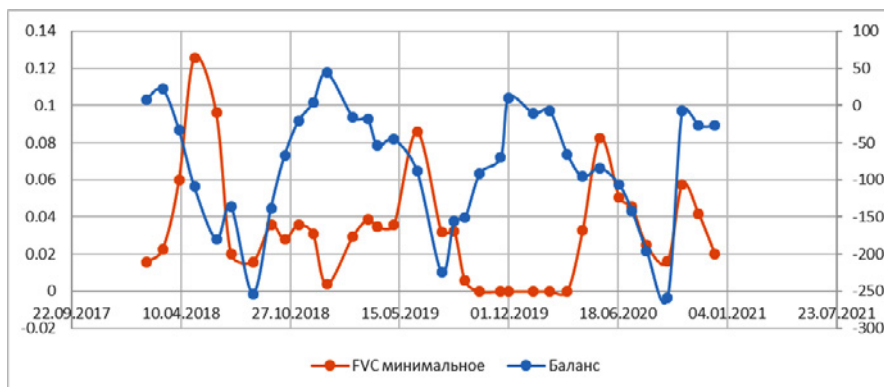
По данным архива погоды г. Евпатория за 2018–2020 гг. была рассчитана среднесуточная испаряемость (E_0) для периодов между датами, на которые были рассчитаны FVC по снимкам Sentinel-2. Среднесуточная испаряемость была вычислена по следующей формуле [Караев и др., 2015]:

$$E_0 = 6 \times 10^{-5} \times (t_a + 29)^2 \times (100 - r), \quad (1)$$

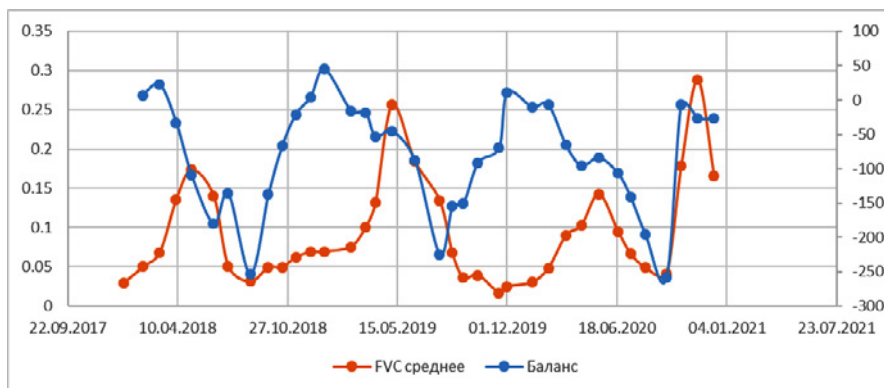
где t_a – среднесуточная температура воздуха, °C; r – среднесуточная относительная влажность воздуха, %. Сумма значений среднесуточной испаряемости за каждый из периодов была вычтена из суммы осадков, в результате этого была получена величина баланса (в мм) за каждый из периодов (рис. 7).



(a)



(b)



(c)

Рис. 7. Графики изменения баланса и FVC максимального (a), минимального (b) и среднего (c)
Fig. 7. Graphs of changes in balance and FVC maximum (a), minimum (b) and average (c)

Рис. 7 показывает, что существует некоторая взаимосвязь во времени между балансом и проективным покрытием растительности. Наибольшее значение баланса по графикам приходится на 08.03.2018, 02.01.2019, 01.12.2019, 13.10.2020. Наибольшее значение FVC приходится на 05.05.2018, 05.05.2019, 16.05.2020, 12.11.2020. Таким образом, максимальные значения баланса предшествуют максимальным значениям FVC. Минимальные значения баланса совпадают во времени с минимальными значениями FVC (20.08.2018, 16.09.2020) или предшествуют им (31.07.2019).

При сопоставлении ортофотоплана, полученного в ходе обработки ортофотоснимков с БПЛА DJI Mavic Pro, снятых 26.09.2020, и растра проективного покрытия растительности, рассчитанного на основе спутникового снимка Sentinel-2 от 26.09.2020, было выявлено, что часть пикселей, характеризующие более высокие значения проективного покрытия растительности, по сравнению с окружающими пикселями, приурочена к курганам (рис. 8).

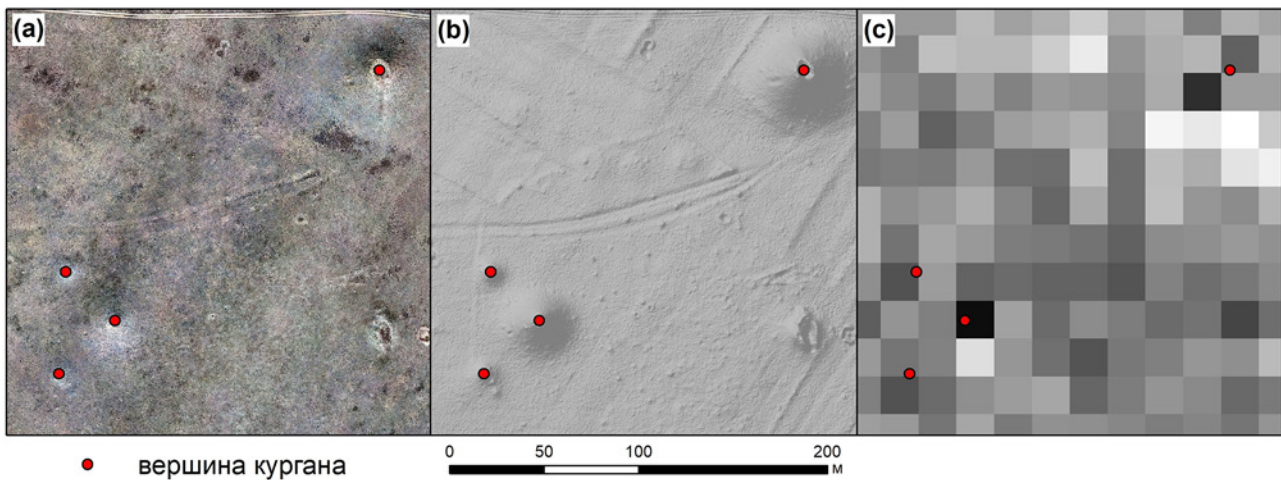


Рис. 8. Фрагменты ортофотоплана (a), карты высот (b) и растра проективного покрытия растительности (c) с отмеченными на них курганами

Fig. 8. Fragments of orthomosaic (a), elevation map (b) and raster of fractional vegetation cover (c) with mounds marked on them

ВЫВОДЫ

В ходе данной работы была показана возможность использования спутниковых снимков Sentinel-2 для изучения динамики проективного покрытия растительности на примере территории разновременных залежных земель возле античного поселения Тюмень II, расположенного в Центрально-Крымской равнинной степи. Данные о проективном покрытии растительности за период 2018–2020 гг., совместно с климатическими данными, показали возможность прогнозирования динамики проективного покрытия растительности во времени. Изучение динамики изменения проективного покрытия растительности на территории залежных земель с помощью дистанционных методов совместно с изучением факторов, влияющих на его изменение, позволит предсказать изменение экосистем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 20-67-46017.

ACKNOWLEDGEMENTS

The reported research was funded by the Russian Science Foundation (grant No. 20-67-46017).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бузук Г.Н., Созинов О.В. Методы учета проективного покрытия растений: сравнительная оценка с использованием фотоплощадок. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2014. Т. 16. № 5 (5). С. 1644–1649.
2. Караев А.И., Сушко С.Л., Горбач Н.М. Расчетный метод определения режимов орошения с использованием климатических показателей. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, 2015. Т. 17. № 9. С. 9–12.
3. Николаева Т.Г., Григорьян Б.Р., Сунгатуллина Л.М. Сохранение биоразнообразия и почвенного плодородия – основа устойчивого развития органического сельского хозяйства. Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки, 2011. Т. 153. № 1. С. 136–151.
4. Смекалова Т.Н. Памятники эпохи бронзы и раннего железного века на полуострове Тарханкут: Каталог. Симферополь: Доля, 2010. 204 с.
5. Смекалова Т.Н., Волошинов А.А., Гарипов А.С. Дистанционные и геофизические методы в изучении системы расселения, пространственной структуры и хозяйственных типов позднескифских поселений Юго-Западного Крыма. Stratum plus, 2016. № 4. С. 269–298.
6. Терехин Э.А. Сезонная динамика проективного покрытия растительности агроэкосистем на основе спектральной спутниковой информации. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019. Т. 16. № 4. С. 111–123. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-111-123.
7. Шевченко Е.Н., Кузнецов А.Н., Кириллова Н.А. Залежные земли как способ сохранения биоразнообразия степных фитоценозов. Материалы IX Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии», Гродно, 23–25 октября 2013 г. С. 60–62.
8. Gao L., Wang X., Johnson B.A., Tian Q., Wang Y., Verrelst J., Mu X., Gu X. Remote sensing algorithms for estimation of fractional vegetation cover using pure vegetation index values: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020. V. 159. P. 364–377. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.11.018.
9. Kim J., Kang S., Seo B., Narantsetseg A., Han Y. Estimating fractional green vegetation cover of Mongolian grasslands using digital camera images and MODIS satellite vegetation indices. GIScience & Remote Sensing, 2020. V. 57. No. 1. P. 49–59. DOI: 10.1080/15481603.2019.1662166.
10. Lisetskii F.N., Marinina O.A., Poletaev A.O., Zelenskaya E. Ya. Comparative evaluation of pollution by heavy metals of ploughed and fallow land at various duration of agropedogenesis. Journal of Agriculture and Environment, 2020. No. 3 (15). P. 1–6. DOI: 10.23649/jae.2020.3.15.2.
11. Lisetskii F.N., Marinina O.A., Jakuschenko D.G. A new approach to dating the fallow lands in old-cultivated areas of the steppe zone. Research Journal of pharmaceutical, biological and chemical sciences, 2014. V. 5. No. 6. P. 1325–1330.
12. Melville B., Fisher A., Lucieer A. Ultra-high spatial resolution fractional vegetation cover from unmanned aerial multispectral imagery. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019. V. 78. P. 14–24. DOI: 10.1016/j.jag.2019.01.013.
13. Sankey T.T., McVay J., Swetnam T.L., McClaran M.P., Heilman P., Nichols M. UAV hyperspectral and lidar data and their fusion for arid and semi-arid land vegetation monitoring. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 2018. V. 4. No. 1. P. 20–33. DOI: 10.1002/rse2.44.
14. Vermeulen L.M., Munch Z., Palmer A. Fractional vegetation cover estimation in southern African rangelands using spectral mixture analysis and Google Earth Engine. Computers and Electronics in Agriculture, 2021. V. 182. P. 105980. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105980.
15. Wang B., Jia K., Liang S., Xie X., Wei X., Zhao X., Yao Y., Zhang X. Assessment of Sentinel-2 MSI spectral band reflectances for estimating fractional vegetation cover. Remote Sensing, 2018. V. 10. No. 12. P. 1927. DOI: 10.3390/rs10121927.

REFERENCES

1. *Buzuk G.N., Sozinov O.V.* Accounting methods of plants projective cover: comparative evaluation using photo sites. Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2014. V. 16. No. 5 (5). P. 1644–1649. (in Russian).
2. *Gao L., Wang X., Johnson B.A., Tian Q., Wang Y., Verrelst J., Mu X., Gu X.* Remote sensing algorithms for estimation of fractional vegetation cover using pure vegetation index values: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020. V. 159. P. 364–377. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.11.018.
3. *Karaev A.I., Sushko S.L., Gorbach N.M.* Calculating method for defining irrigation modes using climatic indices. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, 2015. V. 17. No. 9. P. 9–12. (in Russian).
4. *Kim J., Kang S., Seo B., Narantsetseg A., Han Y.* Estimating fractional green vegetation cover of Mongolian grasslands using digital camera images and MODIS satellite vegetation indices. GIScience & Remote Sensing, 2020. V. 57. No. 1. P. 49–59. DOI: 10.1080/15481603.2019.1662166.
5. *Lisetskii F.N., Marinina O.A., Poletaev A.O., Zelenskaya E.Ya.* Comparative evaluation of pollution by heavy metals of ploughed and fallow land at various duration of agropedogenesis. Journal of Agriculture and Environment, 2020. No. 3 (15). P. 1–6. DOI: 10.23649/jae.2020.3.15.2.
6. *Lisetskii F.N., Marinina O.A., Jakuschenko D.G.* A new approach to dating the fallow lands in old-cultivated areas of the steppe zone. Research Journal of pharmaceutical, biological and chemical sciences, 2014. V. 5. No. 6. P. 1325–1330.
7. *Melville B., Fisher A., Lucieer A.* Ultra-high spatial resolution fractional vegetation cover from unmanned aerial multispectral imagery. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019. V. 78. P. 14–24. DOI: 10.1016/j.jag.2019.01.013.
8. *Nikolaeva T.G., Grigoryan B.R., Sungatullina L.M.* Conservation of biodiversity and soil fertility is the basis for sustainable development of organic agriculture. Scientific notes of Kazan University. Series Natural Sciences, 2011. V. 153. No. 1. P. 136–151. (in Russian).
9. *Sankey T.T., McVay J., Swetnam T.L., McClaran M.P., Heilman P., Nichols M.* UAV hyperspectral and lidar data and their fusion for arid and semi-arid land vegetation monitoring. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 2018. V. 4. No. 1. P. 20–33. DOI: 10.1002/rse2.44.
10. *Shevchenko E.N., Kuznetsov A.N., Kirillova N.A.* Fallow lands as a way to preserve the biodiversity of steppe phytocenoses. Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference “Actual problems of ecology”, Grodno, October 23–25, 2013. P. 60–62. (in Russian).
11. *Smekalova T.N.* Monuments of the Bronze Age and Early Iron Age on the Tarkhankut Peninsula: Catalog. Simferopol: Dolia, 2010. 204 p. (in Russian).
12. *Smekalova T.N., Voloshinov A.A., Garipov A.S.* Remote sensing and geophysical methods in studying of settlement system, spatial distribution and household types of the late scythian sites in South-Western Crimea. Stratum Plus, 2016. No. 4. P. 269–298. (in Russian).
13. *Terekhin E.A.* Seasonal dynamics of the agroecosystems green vegetation fraction derived from satellite data. Current problems in remote sensing of the Earth from space, 2019. V. 16. No. 4. P. 111–123. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-111-123. (in Russian).
14. *Vermeulen L.M., Munch Z., Palmer A.* Fractional vegetation cover estimation in southern African rangelands using spectral mixture analysis and Google Earth Engine. Computers and Electronics in Agriculture, 2021. V. 182. P. 105980. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105980.
15. *Wang B., Jia K., Liang S., Xie X., Wei X., Zhao X., Yao Y., Zhang X.* Assessment of Sentinel-2 MSI spectral band reflectances for estimating fractional vegetation cover. Remote Sensing, 2018. V. 10. No. 12. P. 1927. DOI: 10.3390/rs10121927.