

ЖЕРДІ ҚАШЫҚТЫҚТАН ЗОНДТАУ
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ
REMOTE SENSING OF THE EARTHDOI 10.51885/1561-4212_2023_3_113
MPHTI 89.57.35**И.С. Витковская¹, М.Ж. Батырбаева¹, Д.В. Малахов², Ж.К. Идришева³**¹АО «Национальный центр космических исследований и технологий»,
г. Алматы, Казахстан

E-mail: irinas_vit@mail.ru, madina-iki@mail.ru*

²РГП «Институт зоологии» КН МНВО РК, г. Алматы, Казахстан

E-mail: d_malakhov_73@mail.ru

³Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail: zhanat.idr@mail.ru

**ВАРИАЦИИ УРОЖАЙНОСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ СТЕПНЫХ ПАСТБИЩ КАЗАХСТАНА
ПРИ РАЗНОМ УВЛАЖНЕНИИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ****ЖЕРСЕРІК ДЕРЕКТЕР БОЙЫНША ӨРТҮРЛІ ЫЛҒАЛДАНҒАН КЕЗДЕ ҚАЗАҚСТАННЫҢ
ТАБИҒИ ДАЛА ЖАЙЫЛЫМДАРЫ ШЫҒЫМДЫЛЫҒЫНЫҢ ВАРИАЦИЯЛАРЫ****VARIATIONS IN THE YIELD OF NATURAL STEPPE PASTURES IN KAZAKHSTAN WITH
DIFFERENT HUMIDIFICATION BY SATELLITE DATA**

Аннотация. В статье приведены краткий обзор существующих подходов расчета сезонной урожайности пастбищ, результаты расчета фактической и средней урожайности на примере Наурзумского государственного заповедника как территории, подверженной минимальному антропогенному воздействию. Рассмотрена чувствительность ряда спектральных индексов к характеристикам растительного покрова. Рассчитаны корреляции между фактической наземной урожайностью и использованными спутниковыми индексами, показавшие достаточно высокие значения. Для пастбищ степной зоны, в особенности для территорий, отнесенных к категории особо охраняемым природным территориям, где велика доля интразональной растительности, представляется обоснованным применять индекс SAVI. Данный индекс чувствителен к концентрации хлорофилла в растительном покрове. Кроме того, этот индекс учитывает влияние сигнала обнаженных почв, что делает его более чувствительным к деталям распределения растительности в смешанных ландшафтах. С применением полученного уравнения расчета урожайности, проведено сравнение сезонной урожайности в засушливом (2019) и влажном (2016) годах. Показано, что основная потеря урожайности степных пастбищ в засушливые годы приходится на весенний и раннелетний периоды. В статье обосновывается целесообразность и необходимость внедрения алгоритмов и результатов обработки спутниковых данных в деятельность особо охраняемых природных территорий.

Ключевые слова: степная зона Казахстана, естественные пастбища, урожайность, дистанционное зондирование.

Аңдатпа. Мақалада жайылымдардың маусымдық өнімділігін есептеудің қолданыстағы тәсілдеріне қысқаша шолу, Наурызым мемлекеттік қорығының мысалында ең аз антропогендік әсерге ұшыраған аумақ ретінде нақты және орташа өнімділікті есептеу нәтижелері келтірілген. Бірқатар спектрлік индекстердің өсімдік жамылғысының сипаттамаларына сезімталдығы қарастырылады. Нақты жердің беттік өнімділігі мен жеткілікті жоғары мәндерді көрсететін спутниктік индекстер арасындағы корреляциялар есептелген. Дала аймағының жайылымдары үшін,

әсіресе интразоналды өсімдіктердің үлесі жоғары ерекше қорғалатын табиғи аумақтар санатына жатқызылған аумақтар үшін SAVI индексі қолдану негізді болып көрінеді. Бұл индекс өсімдік жамылғысындағы хлорофилл концентрациясына сезімтал. Сонымен қатар, бұл индекс жалаңаштанған топырақ сигналының әсерін ескереді, бұл оны аралас ландшафттардағы өсімдіктердің таралу бөлшектеріне сезімтал етеді. Алынған өнімділікті есептеу теңдеуін қолдана отырып, құрғақ (2019) және ылғалды (2016) жылдардағы маусымдық өнімділікті салыстыру жүргізілді. Құрғақ жылдары дала жайылымдарының негізгі өнімділікті жоғалтылуы көктем мен жаздың басында болатындығы көрсетілген. Мақалада ерекше қорғалатын табиғи аумақтардың қызметіне спутниктік деректерді өңдеу алгоритмдері мен нәтижелерін енгізудің орындылығы мен қажеттілігі негізделді.

Түйін сөздер: Қазақстанның дала аймағы, табиғи жайылымдар, өнімділік, қашықтықтан зондтау.

Abstract. The brief review of current approaches of the seasonal productivity calculation in natural pastures by remotely sensed data is given. Results and comparison of actual and averaged productivity estimation are discussed for Naurzum Nature Reserve, chosen as the example of the area with minimal human impact. The sensitivity of some spectral indices to the characteristics of vegetation is discussed. Correlation between ground-measured productivity and spectral indices varies from high to very high. The SAVI is recommended to apply when the study area is represented with mixed landscapes and high content of intrazonal vegetation communities. SAVI is sensitive to chlorophyll concentration in green biomass, as well as it reduces the signal of bare soils. SAVI demonstrates better sensitivity to the subtle variations of vegetation conditions in mixed landscapes than other vegetation indices do. The equation, based on SAVI, was used to estimate and to compare seasonal pasture productivity of dry and wet years. It is concluded that the main loss of the productivity during dry year takes place in spring and early-summer. The article substantiates the feasibility and the need to introduce algorithms and the results of satellite data processing into the activities of Natural Reserves.

Keywords: steppe zone of Kazakhstan, natural pastures, productivity, remote sensing.

Введение. Обзор дистанционных методов расчета урожайности в мире и в РК.

На запасы углерода в постоянных пастбищах оказывает влияние деятельность человека и стихийные возмущения, включая заготовку древесной биомассы, деградацию пастбищ, выпасы скота, пожары, восстановление, управление пастбищами и т.д. Годовое производство биомассы на пастбищах может быть значительным, но, вследствие быстрого оборота и потерь в результате выпаса скота и пожаров, располагаемые запасы надземной биомассы на многих пастбищах редко превышают несколько тонн на гектар [1].

Расчет урожайности основан на двух основных подходах. Первый подход подразумевает разработку модели, учитывающей, помимо непосредственной информации со спутника, метеопараметры, данные о плодородии почв и другие факторы, недоступные для дистанционного зондирования [2]. Данный подход применяется почти исключительно при расчетах урожайности сельскохозяйственных культур и лесов. Второй подход основан на установлении регрессионных зависимостей между непосредственными наземными измерениями урожайности пастбищных сообществ и спутниковых индексов с последующим расчетом урожайности исключительно по спутниковой информации. Перспективным направлением в сфере мониторинга пастбищ является совместное использование электронно-оптических и радиолокационных спутниковых данных. Разрабатываются методы дистанционного определения концентрации основных питательных веществ в почве, а также качественной и количественной оценки концентрации гумуса. Чаще всего, оценка качества пастбищ, расчет валовой урожайности, выявление деградированных территорий с применением данных дистанционного зондирования Земли осуществляется на основе вегетационных спутниковых индексов [3]. Вегетационными принято называть группу спектральных индексов, расчет которых основан на красном и ближнем инфракрасном каналах спутниковых изображений с целью подчёркивания и усиления сигнала хлорофилла [4].

В Казахстане, на территории которого издревле развито животноводство, а также обитают ценные виды диких копытных животных, исследования в сфере мониторинга пастбищных угодий являются важной частью комплекса мероприятий по устойчивому использованию и эффективному управлению пастбищными ресурсами. Площадь естественных пастбищных угодий в Казахстане составляет не менее 187 миллионов гектар. На таких обширных территориях ежегодный наземный мониторинг является чрезвычайно затратным мероприятием, не позволяющим охватить наземными наблюдениями даже основные типы пастбищных угодий, что делает выбор данных дистанционного зондирования особенно актуальным.

Одной из первых работ, посвященных мониторингу пастбищ и расчету их продуктивности посредством дистанционного зондирования, является работа Л.В. Лебедь [5], в которой рассмотрены подробные методики расчета урожайности пастбищ различных типов с применением фотометрического оборудования, принимающего сигнал в красном и инфракрасном диапазонах [5], т.е. в диапазонах электромагнитного излучения, аналогичных спутниковым данным.

В настоящее время вопросами применения спутниковых данных в различных сферах сельскохозяйственного производства занимается АО «Национальный центр космических исследований и технологий» (АО «НЦКИТ»). Применение спутниковых данных для изучения и мониторинга пастбищ является одним из приоритетных направлений деятельности АО «НЦКИТ», сотрудниками которого в тесном взаимодействии со специалистами почвоведов, гидрологами, геоботаниками проведены многочисленные наземные подспутниковые наблюдения в различных регионах Республики, включающие как описательную, так и инструментально-измерительную части. Специалистами центра разработаны дистанционные методы и алгоритмы качественного и количественного анализа состояния пастбищ, включающие такие аспекты, как засоление и деградация почв, риски деградации пастбищ, оценка количественных показателей пастбищных угодий (продуктивность, общее проективное покрытие). Результаты исследований опубликованы в серии научных статей [6, 7, 8, 9]. Данная статья посвящена методикам расчета сезонной урожайности пастбищ в степной зоне Казахстана на примере Наурзумского заповедника.

Материалы и методы исследования. Территория исследований. РГУ «Наурзумский государственный природный заповедник» расположен на территории Наурзумского и Аулиекольского районов Костанайской области (рис. 1). Заповедник является особо охраняемой природной территорией, имеет экологическую и научную ценность.

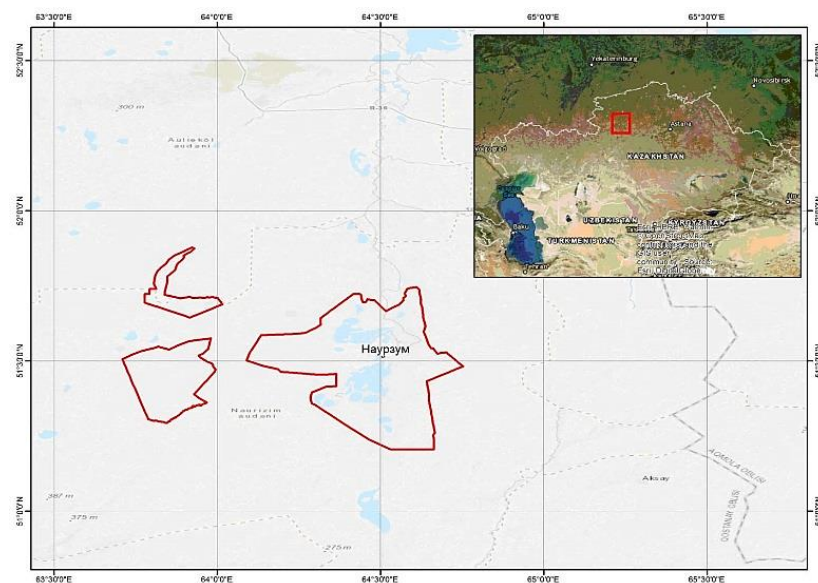


Рисунок 1. Территория исследования

Наурзумский заповедник представляет антропогенно ненарушенный природный объект, на территории которого сохраняются в естественном состоянии типичные, редкие и уникальные природные комплексы животного и растительного мира степной зоны Северного Казахстана.

В [10,11] приведено описание флоры Наурзумского заповедника. Заповедник разделен на три участка: Наурзум, Терсек, Сыпсын. Растительный покров участка Наурзум представлен различными типами степей (разнотравно-песчаноковыльные, кустарниково-разнотравно-красноковыльные, типчаково-ковыльные, комплексные), заливными злаковыми лугами и галофитными сообществами, а также Наурзумский бор. В Сыпсыне представлены мелколиственные колковые леса, сухие луга, разнотравно-песчаноковыльные, разнотравно-песчаноковыльно-красноковыльные степи, небольшие заболоченные озера и галофитные сообщества в пойме реки Наурзум-карасу. Терсек включает одноименный колковый сосновый бор, склоновые варианты зональных типчаково-ковыльковых степей, кустарниково-разнотравно-красноковыльные, типчаково-ковыльные степи и галофитные сообщества и их комплексы.

Результаты дистанционной оценки продуктивности пастбищ могут иметь практическое значение в деятельности заповедника, выступая в качестве источника информации, особенно в засушливые годы, когда возможен дефицит кормовых ресурсов.

Отношения значений яркости в красном и инфракрасном (ИК) диапазонах для почв и искусственных материалов коррелируют с почвенной линией [12], располагаясь вдоль нее у основания графика, в то время как зеленая растительность занимает позицию у верхней части графического распределения точек (рис. 2). Этот принцип лег в основу разработки спутниковых вегетационных индексов.

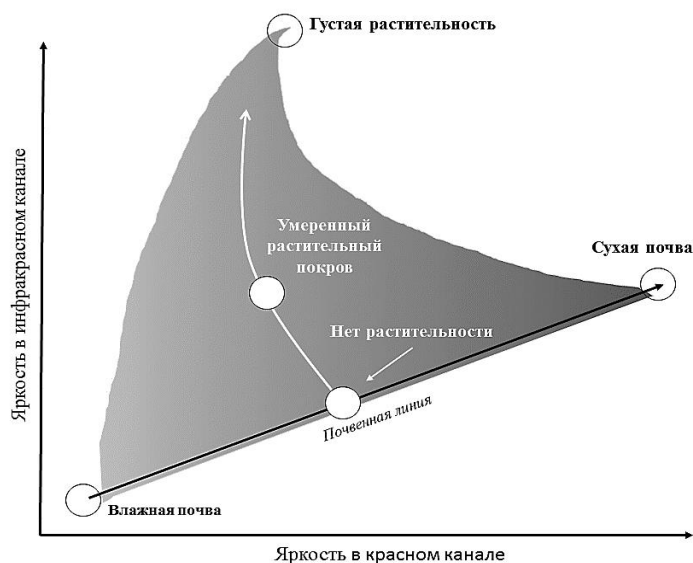


Рисунок 2. Иллюстрация трансформации Tassled Cap, демонстрирующая спектральное распределение растительности и открытых почв в отношении NIR/RED [12]

Для изучения корреляционной зависимости наземных измерений продуктивности растительного покрова в степной зоне и спутниковых данных были выбраны несколько спектральных индексов. Индексы разделены на следующие группы: а) nir-red индексы, чувствительные к содержанию хлорофилла (NDVI, SAVI, MNLI); б) инфракрасные индексы, чувствительные к содержанию влаги в растительности (NDMI); в) «смешанные» индексы, в которых задействованы видимый (дополнительно к красному каналу) и ИК-диапазоны (VSDI, PanNDVI), а также некоторые индексы, используемые для составления карты почвенно-растительного покрова территории исследования. Перечень индексов, использованных в данной работе, приведен в табл. 1.

Таблица 1. Перечень использованных спектральных индексов

Индекс	Формула	Ссылка
SAVI	$SAVI = \left(\frac{nir - red}{nir + red + L} \right) (1 + L)$	[13]
VSDI	$VSDI = 1 - ((swir_2 - blue) + (red - blue))$	[14]
PanNDVI	$PanNDVI = \frac{(nir - blue + green + red)}{(nir + blue + green + red)}$	[15]
NDVI	$NDVI = \frac{(nir - red)}{(nir + red)}$	[16]
NDWI	$NDWI = \frac{(green - nir)}{(green + nir)}$	[17]
NDMI	$NDMI = \frac{nir - swir}{nir + swir}$	[18]

MNLI	$MNLI = \frac{(nir^2 - red) * (1 + L)}{nir^2 + red + L}$	[19]
BSI	$BSI = 100 * \sqrt{\frac{swir - blue}{swir + blue}}$	[20]

Индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [16] нашел широкое применение в изучении растительности; он используется для оценки состояния и урожайности сельскохозяйственных культур, продуктивности пастбищ, оценки залежей и т.д. Очень часто индекс напрямую связан с другими наземными параметрами, такими как проективное покрытие, фотосинтетическая активность растений, поверхностная влага, индекс площади листы и количество биомассы. Физическая основа индекса NDVI и подобных ему индексов связана со способностью хлорофилла поглощать красный и отражать инфракрасный свет. Открытые почвы (лишенные растительного покрова) и почвы с разреженной растительностью дают, напротив, сильный сигнал в красной области спектра. В силу своей привязанности к количеству фотосинтезирующей биомассы NDVI не эффективен на снимках, полученных в сезон ослабленной или не вегетирующей в этот период растительности.

SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) является вегетационным индексом (модификация NDVI), разработанным для внесения поправок на влияние почв в условиях разреженного растительного покрова [13]. Одним из возможных применений индекса SAVI является расчет биомассы на лесистых и травянистых массивах [21]. Значимый диапазон индекса VSDI (Visible And Shortwave Infrared Drought Index) [14] заключен в интервале значений от нуля до единицы. Чем ближе значения индекса к единице, тем влажнее поверхность, будь то почва, растительность или их сочетание. Значения индекса больше единицы относятся к воде, снегу, льду.

Индекс PanNDVI [15] включает все видимые (т.е. синий, зеленый, красный) и ближний инфракрасный каналы спутникового изображения. Индекс разрабатывался для расчета биофизических параметров рисовых плантаций, однако его применение может быть оправданным в случаях густого растительного покрова естественного происхождения.

Modified Non-Linear Index (MNLI) объединяет нелинейный индекс (NLI) и индекс SAVI для учета влияния почвенного фона [19]. Значение L, используемое по умолчанию, равно 0,5.

Невегетационные индексы, связанные с продуктивностью растительного покрова:

- BSI (Bare Soil Index). В [20] обнаружили, что сигналы в среднем инфракрасном и зеленом каналах являются наилучшим сочетанием для выявления открытых почв. Для успешного применения BSI должны быть определены пороговые значения отдельных категорий. Значения BSI, близкие к 0, соответствуют воде и густым теням, значения между 0 и 40 – травянистому покрову. В целом, значения индекса выше 40 соответствуют различным типам открытой почвы. Данный индекс обратно пропорционален вегетационным индексам, т.е. демонстрирует низкие значения на территориях, покрытых растительностью. Его применение в пастбищном мониторинге, помимо прямого назначения – выявления территорий, лишённых растительности, может иметь смысл в условиях недостаточной чувствительности вегетационных индексов на разреженной растительности.

- NDMI (Normalized Difference Moisture Index). В. Gao [18] предложил в качестве инструмента оценки состояния растительного покрова индекс, основанный на взаимодействии ближнего инфракрасного и коротковолнового инфракрасного каналов, чувствительный к содержанию влаги в зеленой растительности.

Расчеты сезонной урожайности в Наурзумском заповеднике осуществлены для вегетационного периода 2016 и 2019 годов по спутниковым данным Landsat-8. Такой выбор определялся условиями влагообеспеченности региона: 2016 год – нормальное количество осадков, 2019 – засушливый год [22,23].

Для каждого года осуществлен подбор безоблачных сцен, соответствующих друг другу в отношении даты съемки, при использовании архива спутниковой информации NASA [24]. Список использованных данных спутниковой съемки приведен в табл. 2.

Таблица 2. Данные Landsat-8, на основе которых проведен расчет сезонной урожайности в Наурзумском заповеднике

Сцена Landsat 8	Дата съемки
LC08_L1TP_160024_20160523_20170324_01_T1	23 мая 2016
LC08_L1TP_160024_20160608_20170324_01_T1	8 июня 2016
LC08_L1TP_160024_20160928_20170320_01_T1	28 сентября 2016
LC08_L1TP_160024_20190516_20190521_01_T1	16 мая 2019
LC08_L1TP_160024_20190601_20190605_01_T1	1 июня 2019
LC08_L1TP_160024_20191007_20191018_01_T1	7 октября 2019

Обработка спутниковых снимков включала атмосферную коррекцию, радиометрическую калибровку, создание мозаики и ее обрезку по территории тестового участка, расчет соответствующих спектральных индексов. Обработка спутниковых данных проводилась с применением стандартных алгоритмов L3HARRIS Geospatial ENVI 5.3. Картографическое представление результатов осуществлено с использованием ESRI ArcGIS 10.4.

В качестве опорной наземной информации использованы опубликованные данные об урожайности степных пастбищ [25,26,27] и данные полевых измерений в степных регионах РК, полученные сотрудниками АО «НЦКИТ» в ходе выполнения различных проектов пастбищной и экологической направленности.

Результаты и обсуждение. На территориях с разреженным растительным покровом (<40%) и обнаженной поверхностью почвы отражение в красном и инфракрасном каналах существенно меняется, сильно влияя на показатели вегетационных индексов. Спектрометрические исследования, проведенные АО «НЦКИТ» на различных типах пустынных и степных пастбищ, схожих по природным условиям с исследуемой территорией во время вегетационного сезона, хорошо иллюстрируют это явление (рис. 3). Здесь КСЯ означает коэффициент спектральной яркости.

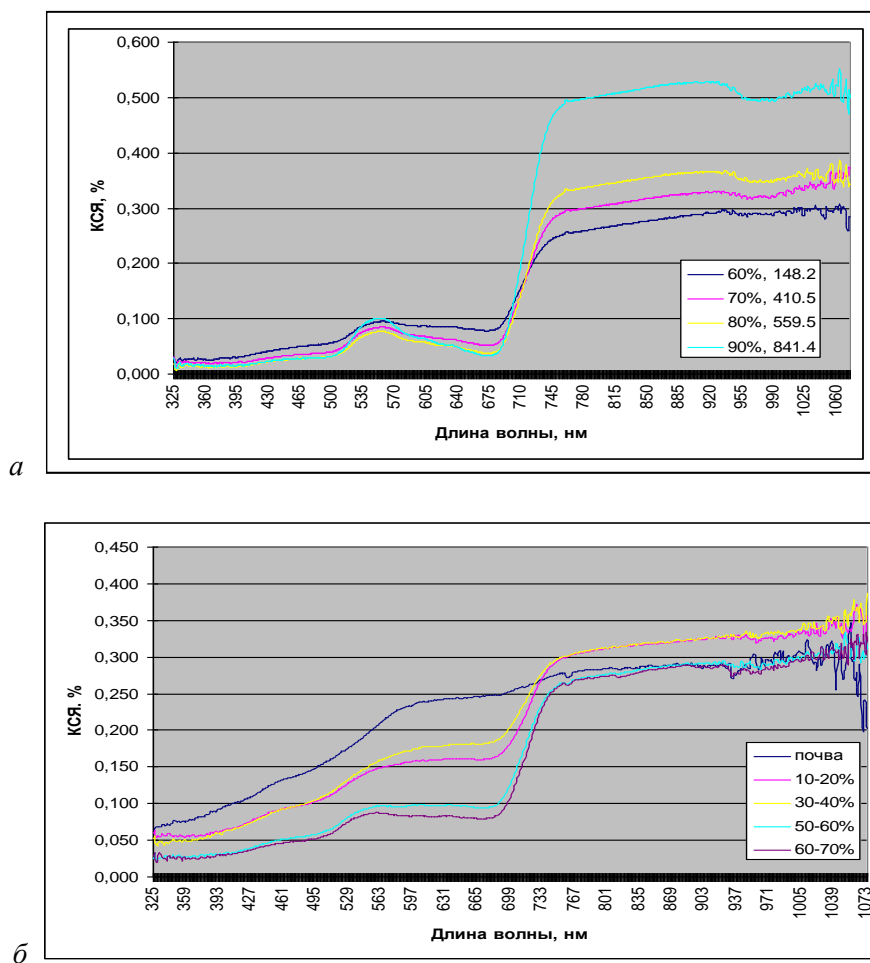


Рисунок 3. Спектральные характеристики: *а* – разреженной пустынной растительности; *б* – густого растительного покрова

На рис. 3, *б* хорошо заметен пик отражения в инфракрасном диапазоне (710-760 нм), свойственный густому растительному покрову. В случае разреженной растительности сигнал хлорофилла в инфракрасном канале в значительной степени засвечивается сигналом открытых почв в красном диапазоне, что может приводить к значительному снижению точности распознавания растительности (рис. 3, *а*). Особенно это заметно при анализе сцен, содержащих разные типы почв, отражательная способность которых в красном и инфракрасном диапазонах отличается (т.е. почвы имеют различные показатели яркости). Данное обстоятельство заставляет проявлять известную осторожность при выборе вегетационного индекса для территорий, неоднородных в плане плотности растительного покрова. При возможности, для снижения величины возможной ошибки, следует отказаться от индекса NDVI в пользу индексов, учитывающих влияние почвы. Исходя из этих соображений, для расчета урожайности нами применялся индекс SAVI, имеющий в условиях засушливого сезона (или года) большую чувствительность, нежели индекс NDVI.

Для вегетационных индексов была изучена корреляция фактической урожайности по наземным данным и спутниковых индексов. Корреляции между данными фактической наземной урожайности, полученными в [25,26,27], и использованными индексами

достаточно высоки (табл. 3).

Таблица 3. Перечень вегетационных индексов, их корреляция с урожайностью

Индекс	Коэффициент корреляции урожайности и вегетационного индекса
SAVI	0,77
PanNDVI	0,75
NDVI	0,8
NDMI	0,63
MNLI	0,77
VSDI	0,75

На рис. 4 представлен график дисперсии значений индекса SAVI и наземной урожайности; приведено выражение для расчета урожайности (1).

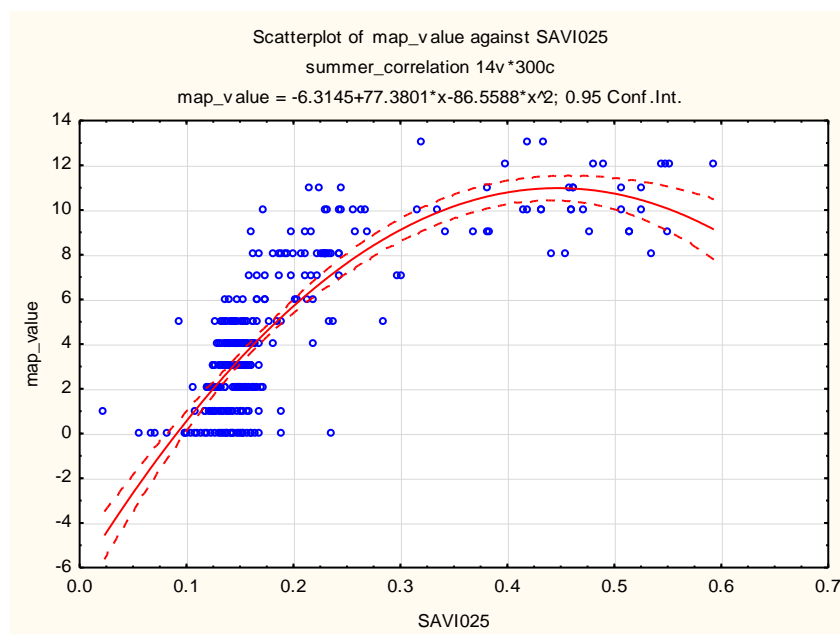


Рисунок 4. Корреляция значений индекса SAVI и наземной урожайности
Уравнение для расчета урожайности имеет вид:

$$Biomass = -6,3145 + 77,3801 * SAVI - 86,5588 * SAVI^2, \quad (1)$$

где SAVI – значения рассчитанного по спутниковым данным индекса.

С использованием данного выражения рассчитана серия карт фактической сезонной урожайности на территории Наурзумского заповедника (рис. 5).

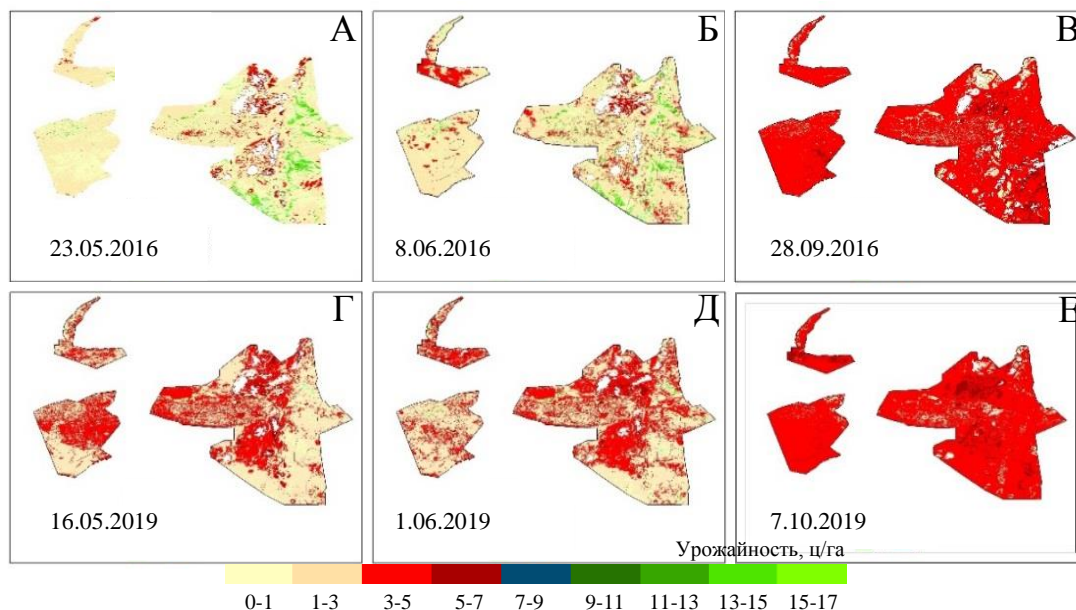


Рисунок 5. Фактическая урожайность пастбищ по спутниковым данным (верхний ряд – 2016 г., нижний ряд – 2019 г.): А – 23 мая 2016 г.; Б – 8 июня 2016 г., В – 28 сентября 2016 г., Г – 16 мая 2019 г., Д – 1 июня 2019 г.; Е – 7 октября 2019 г.

Карты фактической урожайности, построенные по снимкам Landsat-8, имеют пространственное разрешение 30 метров на пиксель, что позволяет проводить картирование пастбищных угодий в масштабе до 1:50 000. Такой масштаб удовлетворяет потребностям отдельных хозяйств, ООПТ, администраций деревенских округов. В подобном представлении пользователь получает детальное представление о фактическом распределении растительной массы, видит участки с пониженной плотностью растительного покрова и может принимать обоснованные решения о режиме выпаса скота на тех или иных участках.

Большой интерес для конкретного пользователя могут представлять карты средней урожайности (рис. 6), для расчета которых исходные карты фактической урожайности обрабатываются с использованием функции Zonal Statistics.

Карты средней урожайности, лишенные детализации, позволяют рассчитать площади отдельных выделов и объем растительности в них, пригодный для скота и диких копытных. На основе такой информации животновод может регулировать поголовье скота, выпасаемого на той или иной территории, с целью оптимального использования пастбищных ресурсов.

В [5] для расчета среднесезонной урожайности степных участков, к которым относится территория Наурзумского заповедника, выведены следующие коэффициенты: коэффициент весны – $Kв = 0,9$; коэффициент лета – $Kл = 0,68$; коэффициент осени – $Kо = 0,8$; коэффициент зимы – $Kз = 0,8$ для соответствующих сезонов. Смысл данных коэффициентов в том, что среднесезонная урожайность всегда несколько меньше фактической урожайности, измерения которой производятся в оптимальные для данной ландшафтно-климатической зоны сроки. Кроме того, имея в распоряжении данные коэффициенты, можно вычислять урожайность для сезонов, в которые не проводились наземные измерения либо для которых невозможно подобрать безоблачные спутниковые снимки. В условиях нормальной увлажненности, пик урожайности степных пастбищ приходится на позднюю весну – ранее

лето с постепенным снижением значений урожайности в течение лета и осени. Данные 2016 года (рис. 5, 6) подтверждают эту закономерность. Средняя урожайность весеннего сезона по нашим расчетам имеет значение 5 и более центнеров с гектара, а летняя урожайность того же года снижается до 4...5 ц/га. Осенняя урожайность в условиях нормального увлажнения колеблется от 2 до 4 ц/га. В засушливых условиях (рис. 5, 6) основная потеря урожайности пастбищ связана именно с весенним пиком. В мае 2019 года средняя урожайность составляла 2...4 ц/га, что меньше летней урожайности в нормальном по влажности году. Урожайность в июне 2019 года осталась на весеннем уровне или снизилась примерно на центнер в отдельных выделах. Осенняя урожайность в засушливом году не имеет значительных отличий от осенней урожайности влажного года.

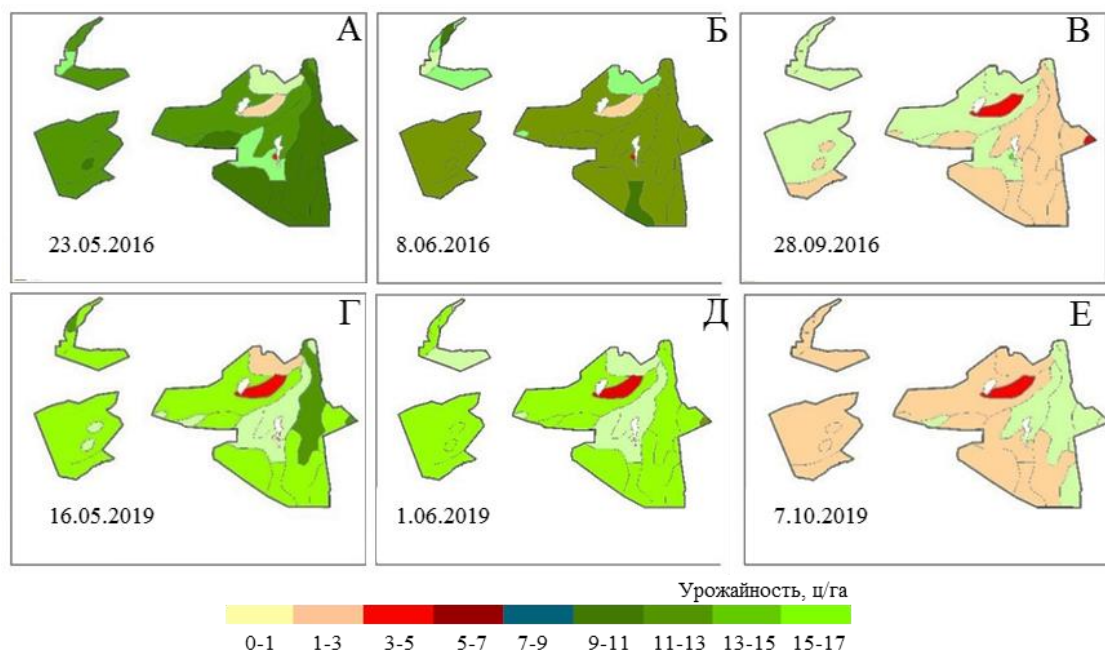


Рисунок 6. Средняя по выделу урожайность пастбищ по спутниковым данным (верхний ряд – 2016 г., нижний ряд – 2019 г.): А – 23 мая 2016 г.; Б – 8 июня 2016 г.; В- 28 сентября 2016 г., Г – 16 мая 2019 г., Д – 1 июня 2019 г.; Е- 7 октября 2019 г.

Заклучение. Описанная в статье методика оценки сезонной урожайности пастбищ опирается на регулярно предоставляемые данные некоммерческой спутниковой съемки. Предлагаемая методика применима к некоммерческим данным различного пространственного разрешения: от 250 м/пиксель (данные TERRA/MODIS) до 10 м/пиксель (данные Sentinel-2), помимо снимков со спутника Landsat-8. Результирующие данные имеют векторный и растровый форматы, что подразумевает возможность их использования в отраслевых веб-ориентированных информационных ресурсах. Достоверность и оперативность расчетов зависят только от качества спутниковых данных; облачный покров снижает достоверность расчетов, а сплошная облачность делает расчеты невозможными. При условии безоблачных спутниковых данных описанная методика является удобным инструментом оценки текущего состояния пастбищ и может быть одним из компонентов эффективного управления пастбищными ресурсами. Применение спутниковой информа-

ции в заповедном деле не ограничивается расчетом продуктивности пастбищ. Спутниковые данные являются оперативным и объективным источником разнообразной информации, включая, но не ограничиваясь, мониторинг водоемов, динамику почвенных характеристик (влажность, содержание гумуса, засоление), выявление очагов естественной и антропогенной деградации, динамику ландшафтных характеристик, контроль землепользования, включая незаконные вырубки и последствия пожаров, и т.д. Использование спутниковых данных на основе существующих методов расчета объективных показателей растительного и почвенного покрова должно быть самым широким образом внедрено в деятельность особо охраняемых природных территорий.

Благодарности. Авторы выражают признательность канд. биол. наук А.Ф. Исламгуловой (Университет «Туран», Алматы) за геоботанические консультации в ходе подготовки статьи. Работа выполнена в рамках «Грантового финансирования научных исследований» Министерства образования и науки РК на 2022-2024 годы, Грант ИРН: AP14871658 «Технология дистанционной оценки состояния растительности Центрального и Северного Казахстана в условиях засухи с учетом природно-климатических особенностей по многолетней спутниковой информации»

Список литературы

1. Верчо Д., Крюг Т., Ласко Р.Д., Огле С., Рейсон Дж., Ли Ю., Мартино Д.Л., МакКонки Б.Дж., Смит П., Карундиту М.У. (2006). Пастбищные угодья. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов. – МГЭИК, 2006. – Т.4: Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования. – С. 1-58.
2. Чертов О.Г., Грабарник П.Я., Шанин В.Н., Быховец С.С., Петропавловский Б.С., Припутина И.В., Фролов П.В., Зубкова Е.В. (2019). Динамические модели наземных экосистем для количественной оценки продуктивности растительности // Растительные Ресурсы. 55(2). – С. 151-169.
3. Gitelson A.A. (2004). Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation // J. Plant Physiol. – 161: 165-173.
4. Huete A.R., Liu H.Q., Batchily K., van Leeuwen W. (1997). A comparison of vegetation indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS // Rem. Sens. Envir. –59:440-451.
5. Лебедь Л.В. (1989). Рекомендации по организации и проведению аэрофотометрических обследований сельскохозяйственных угодий Казахстана / ред. Коробкова Е.Н., Плюто Т.М. – Алма-Ата. – 72 с.
6. Malakhov D.V., Islamgulova A.F. (2014). The quantitative interpretation of pasture image parameters: an experience with low and moderate spatial resolution remotely sensed data application // Optika Atmosfery i Okeana. – 27(7), 587-592.
7. Исламгулова А.Ф., Малахов Д.В. (2015). Оценка состояния растительного покрова песчаных пустынь Казахстана по спутниковым данным среднего разрешения // Матер. междунар. конф. «Экосистемы Центральной Азии в современных условиях социально-экономического развития». Улан-Батор, Монголия. – Т.2. – С. 367-370.
8. Малахов Д.В., Исламгулова А.Ф. (2015). Вычисление сезонных кормозапасов в заказнике «Алтын-Дала» на основе спутниковых данных Landsat. Степи Северной Евразии // Матер. Седьмого междунар. симпозиума. – Оренбург. – С. 505-508.
9. Malakhov D.V., Tsyhuyeva N.Yu. (2020). Calculation of the biophysical parameters of vegetation in an arid area of South-Eastern Kazakhstan using the Normalized Difference Moisture Index (NDMI) // Cent. Asian J. Environ. Sci. Technol. Innov. – 4, 189-198. – Doi http://www.caspress.com/article_111218.html.
10. Иващенко А.А. (1982). Инвентаризация флоры. Заповедное дело в Казахстане. – Алма-Ата. – С. 111-123.
11. Брагин Е.А. (1985). Охрана и восстановление Наурзумского бора. Организация заповедного дела. – Алма-Ата. – С. 84-86.
12. Kauth R.J. and Thomas G.S. (1976). The Tasselled Cap -A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by Landsat. Paper presented at the LARS Symposia, Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue

- University, West Lafayette, IN, June 29–July 1, 4B41-4B51.
13. Huete A. R. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, vol. 25:295-309.
 14. Zhang N., Hong Y., Qin Qi., Liu L. (2013). VSDI: a visible and shortwave infrared drought index for monitoring soil and vegetation moisture based on optical remote sensing // *International Journal of Remote Sensing*. – Vol. 34, No. 13. – 4585–4609. – <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2013.779046>
 15. Wang F., Huang J., Tang Y., Wang X. (2007). New Vegetation Index and Its Application in Estimating Leaf Area of Rice. *Rice Science*. 14(3): 195-203. 10.1016/s1672-6308(07)60027-4
 16. Rouse J. W., Haas R.H., Schell J.A., and Deering D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 309-317.
 17. McFeeters S.K. (1996). The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features // *Int. J. Remote Sensing*. – 17(7), 1425-1432. – <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
 18. Gao B. (1995). Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space, *Proceedings of SPIE* 2480. – Pp. 225-236.
 19. Yang Z., Willis P. and Mueller R.. (2008). Impact of Band-Ratio Enhanced AWIFS Image to Crop Classification Accuracy. *Proceedings of the Pecora 17 Remote Sensing Symposium*, Denver, CO.
 20. Pretorius D.J., and Bezuidenhout C.J. (1994). Report on the development of a methodology to determine the nature, rate and extent of soil erosion in South Africa. A report in fulfillment of contract no. 14/8/1-L1 for the Department of Agriculture, Directorate Resource Conservation, ISCW Report No. GW1A/94/7, Government Press, Pretoria.
 21. Araujo L.S., dos Santos J. R., Shimabukuro Y.E. (2000). Relationship between SAVI and biomass data of forest and savannah contact zone in the Brazilian Amazonia. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. – Vol. 33. – Pp. B7. P.77-81.
 22. Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана: 2016 год. (2017). Республиканское государственное предприятие «Казгидромет». – Астана. – 58 с.
 23. Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана: 2019 год. (2020). Республиканское государственное предприятие «Казгидромет». – Нур-Султан. – 62 с.
 24. <https://earthexplorer.usgs.gov> – архив спутниковой информации NASA
 25. Карта кормовых угодий Казахской ССР. – М 1:1 500 000. (1978).
 26. Акиянова Ф.Ж. (2020). Пространственные данные землепользования и зонирования территории Казахстана: Онлайн семинар «Картирование природы для людей и в Казахстане». Международный научный комплекс «Астана». – Нур-Султан. – 20 с.
 27. Рустемова С.Н. Агроэкологическая оценка природных кормовых угодий Северного Казахстана // *Вестник науки КАТУ им. С. Сейфуллина*. – 2011. – № 1. – Стр 11-16.

References

1. Vercho, D., Kriug T., Lasko R.D., Ogle S., Reison Dzh., Li lu., Martino D.L., MakKonki B.Dzh., Smit P., Karunditu M.U. (2006). [Pastbishchnye ugodia. Rukovodiashchie printsiy natsionalnykh inventarizatsii parnikovykh gazov, MGEIK]. – Tom 4: Selskoe khoziaistvo, lesnoe khoziaistvo i drugie vidy zemlepolzovaniia. – 1-58 (In. Russ.).
2. Chertov O.G., Grabarnik P.Ia., Shanin V.N., Bykhovets S.S., Petropavlovskii B.S., Pripulina I.V., Frolov P.V., Zubkova E.V. (2019). [Dinamicheskie modeli nazemnykh ekosistem dlia kolichestvennoi otsenki produktivnosti rastitelnosti]. *Rastitelnye Resursy*. – 55(2):151-169.
3. Gitelson A.A. (2004). Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation // *J. Plant Physiol.*, 161: 165-173.
4. Huete A.R., Liu H.Q., Batchily K., van Leeuwen W. (1997). A comparison of vegetation indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS // *Rem.Sens.Envir*. – 59:440-451.
5. Lebed L.V. (1989). [Rekomendatsii po organizatsii i provedeniiu aerofotometricheskikh obsledovani selskokhoziaistvennykh ugodii Kazakhstana]. (red. Korobkova E.N., Pliuto T.M.). – Alma-Ata. – 72.
6. Malakhov D. V., Islamgulova A.F. (2014). The quantitative interpretation of pasture image parameters: an experience with low and moderate spatial resolution remotely sensed data application // *Optika Atmosfery i Okeana*. – 27(7):587-592.
7. Islamgulova A.F., Malakhov D.V. (2015). [Otsenka sostoianiia rastitelnogo pokrova peschanykh pustyn Kazakhstana po sputnikovym dannym srednego razresheniia] // *Mater. Mezhdunar. Konf. «Ekosistemy Tsentralnoi Azii v sovremennykh usloviakh sotsialno-ekonomicheskogo razvitiia»*. – Ulan-Bator, Mongoliia. – T.2. 367-370 (In. Russ.).

8. Malakhov D.V., Islamgulova A.F. (2015). [Vychislenie sezonnykh kormozapasov v zakaznike «Altyn-Dala» na osnove sputnikovykh dannykh Landsat]. Stepi Severnoi Evrazii // Mater. sedmogo mezhdunar. simpoziuma. – Orenburg. – 505-508 (In. Russ.).
9. Malakhov D.V., Tsyhuyeva N.Yu. (2020). Calculation of the biophysical parameters of vegetation in an arid area of South-Eastern Kazakhstan using the Normalized Difference Moisture Index (NDMI) // Cent. Asian J. Environ. Sci. Technol. Innov.. – 4, 189-198. – Doi http://www.caspress.com/article_111218.html.
10. Ivashchenko A.A. (1982). [Inventarizatsiia flory. Zapovednoe delo v Kazakhstane]. – Alma-Ata. – 111-123.
11. Bragin E.A. (1985). [Okhrana i vosstanovlenie Naurzumskogo bora. Organizatsiia zapovednogo dela]. – Alma-Ata, 84-86 (In. Russ.).
12. Kauth R.J. and Thomas G.S. (1976). The Tasseled Cap -A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by Landsat. Paper presented at the LARS Symposia, Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue University, West Lafayette, IN, June 29 –July 1, 4B41-4B51.
13. Huete A. R. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) // Remote Sensing of Environment. – Vol. 25:295-309.
14. Zhang N., Hong Y., Qin Qi., Liu L. (2013). VSDI: a visible and shortwave infrared drought index for monitoring soil and vegetation moisture based on optical remote sensing // International Journal of Remote Sensing. – Vol. 34, No. 13. – 4585–4609. – <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2013.779046>.
15. Wang F., Huang J., Tang Y., Wang X. (2007). New Vegetation Index and Its Application in Estimating Leaf Area of Rice. Rice Science. 14(3): 195-203. 10.1016/s1672-6308(07)60027-4.
16. Rouse J. W., Haas R.H., Schell J.A., and Deering D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I : 309-317.
17. McFeeters S.K. (1996). The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features // Int. J. Remote Sensing. – 17(7), 1425-1432. – <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
18. Gao B. (1995). Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space // Proceedings of SPIE. – 2480 :225-236.
19. Yang Sh., Zhang Q., Li W. (2008). Automated estimation of Vegetation Fraction based on Landsat TM/ETM+ imagery. International Conference on Computer Science and Software Engineering. – Pp. 891-894. – DOI 10.1109/CSSE.2008.1337.
20. Pretorius D.J., and Bezuidenhout C.J. (1994). Report on the development of a methodology to determine the nature, rate and extent of soil erosion in South Africa. A report in fulfillment of contract no. 14/8/1-L1 for the Department of Agriculture, Directorate Resource Conservation, ISCW Report No. GW1A/94/7, Government Press, Pretoria.
21. Araujo L.S., dos Santos J. R., Shimabukuro Y.E. (2000). Relationship between SAVI and biomass fava of forest and savannah contact zone in the Brazilian Amazonia. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. – Vol. 33., p. B7. :77-81
22. Ezhegodnyi biulleten monitoringa sostoiianiia i izmeneniia klimata Kazakhstana: 2016 god. (2017). Respublikanskoe gosudarstvennoe predpriatie «Kazgidromet». – Astana. – 58 (In. Russ.).
23. Ezhegodnyi biulleten monitoringa sostoiianiia i izmeneniia klimata Kazakhstana: 2019 god. (2020). Respublikanskoe gosudarstvennoe predpriatie «Kazgidromet». – Nur-Sultan. – 62. (In. Russ.).
24. <https://earthexplorer.usgs.gov> –NASA Satellite Information Archive.
25. Karta kormovykh ugodii Kazakhskoi SSR. - M 1:1 500 000. (1978). (In. Russ.).
26. Akijanova F.Zh. (2020). [Prostranstvennye dannye zemlepol'zovaniia i zonirovaniia territorii Kazakhstana.]: Onlajn seminar «Kartirovanie prirody dlja ljudej i v Kazakhstane». Mezhdunarodnyj nauchnyj kompleks «Astana». – Nur-Sultan. – 20. (In. Russ.).
27. Rustemova S.N. Aerocologicheskaya ocenka prirodnih kormovykh ugodiy Severnogo Kazakhstana // Vestnik nauki KATU im. S.Seyfullin. – 2011. – N1. – 11-16 (In. Russ.).