

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ СЕНОКОСНЫХ ЗЕМЕЛЬ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ
НА ОСНОВЕ НАЗЕМНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ*

Kononova N.A., Larko A.A., Emelyanov D.V.,
Botvich I.Yu.

ASSESSMENT OF HAY LANDS BASED ON GROUND-BASED SPECTROMETRY
(ON THE EXAMPLE OF AGRICULTURAL LAND OF THE KRASNOYARSK REGION)

Кононова Н.А. – мл. науч. сотр. лаб. экологической информатики Института биофизики СО РАН – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск. E-mail: nata_slyusar@mail.ru

Ларько А.А. – вед. математик лаб. экологической информатики Института биофизики СО РАН – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск. E-mail: lantar@inbox.ru

Емельянов Д.В. – инженер лаб. экологической информатики Института биофизики СО РАН – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск. E-mail: dima9526@gmail.com

Ботвич И.Ю. – мл. науч. сотр. лаб. экологической информатики Института биофизики СО РАН – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск. E-mail: irina.pugacheva@mail.ru

Kononova N.A. – Junior Staff Scientist, Lab. of Ecological Informatics, Institute of Biophysics SB RAS – Separate Division of FRC KRC SB RAS, Krasnoyarsk. E-mail: nata_slyusar@mail.ru

Larko A.A. – Leading Mathematician, Lab of Ecological Informatics, Institute of Biophysics SB RAS – Separate Division of FRC KRC SB RAS, Krasnoyarsk. E-mail: lantar@inbox.ru

Emelyanov D.V. – Engineer, Lab of Ecological Informatics, Institute of Biophysics SB RAS – Separate Division of FRC KRC SB RAS, Krasnoyarsk. E-mail: dima9526@gmail.com

Botvich I.Yu. – Junior Staff Scientist, Lab of Ecological Informatics, Institute of Biophysics SB RAS – Separate Division of FRC KRC SB RAS, Krasnoyarsk. E-mail: irina.pugacheva@mail.ru

В работе рассмотрены исследования по изучению структуры и спектральных характеристик травянистых растительных сообществ сенокосных земель Красноярского края. Исследования проводились в течение вегетационного сезона 2018 года на сенокосных землях Сухобузимского (п. Борск) и Емельяновского (п. Минуно) районов. В результате анализа спутниковых данных и полевых рекогносцировочных исследований выделено два тестовых участка, размер и структура травостоя которых позволяют получить статистически достоверные спутниковые и наземные дистанционные данные. Впервые на территории Красноярского края применен комплексный методический подход с использованием наземной спектрометрии на базе спектрорадиометра Spectral Evolution PSR 1100F и одновременных геоботанических описаний, что суще-

ственно повышает репрезентативность результата. Проведенные исследования показывают, что рассмотренные сенокосные угодья Красноярской лесостепи существенно отличаются по видовому составу и структуре травостоя, что связано с их различным происхождением. Условия увлажнения центральной части Красноярского края способствуют формированию продуктивных растительных сообществ с хорошо поедаемыми злаками-доминантами кострецом безостым *Bromus inermis* Leyss и пыреем ползучим *Elytrigia repens* (L.) Nevski. Продуктивность сырой массы варьирует в пределах 501–896 г/м². В ходе проведенных наземных спектрометрических измерений показано, что спектры отражения травостоя до и после сенокосения существенно отличаются по величине коэффициента спектральной яркости. Полученные данные

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-416-243002 p_мол_а.

в дальнейшем будут использованы для верификации дистанционных данных различных спутниковых систем и построения карт распределения спектральных индексов на сенокосных землях Красноярского края.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, наземная спектрометрия, коэффициент спектральной яркости, наземная фитомасса, сенокосы, Красноярская лесостепь.

The paper deals with studies of the structure and spectral characteristics of the herbaceous plant communities of hay lands of the Krasnoyarsk region. The studies were conducted during the growing season of 2018 in the hay lands of Sukhobuzimsky (Borsk) and Yemelyanovsky (Minino) districts. As a result of the analysis of satellite data and field reconnaissance studies, two test sites were identified. The size and structure of the grass stand allows to obtain statistically reliable satellite and ground-based remote data. For the first time in the Krasnoyarsk region, was applied an integrated methodological approach using ground-based spectrometry based on a Spectral Evolution PSR 1100F spectroradiometer and simultaneous geobotanical descriptions, which significantly increases the representativeness of the result. The conducted studies show that the considered grasslands of the Krasnoyarsk forest-steppe differ significantly in species composition and structure of the grass stand, which is associated with different origins. Moisture conditions in the central part of the Krasnoyarsk region contribute to the formation of productive plant communities with well-eaten dominant Bromus inermis Leyss and Elytrigia repens (L.) Nevski. The productivity of the wet phytomass varies from 501 to 896 g/m². In the course of the ground-based spectrometric measurements, it was shown that the reflection spectra of the grass stand before and after haying differ significantly in the magnitude of the spectral brightness coefficient. The data will be used in the future to verify the remote data of various satellite systems and to construct maps of the distribution of spectral indices on the hay fields of the Krasnoyarsk region.

Keywords: remote sensing, ground-based spectrometry, spectral brightness coefficient, above-ground phytomass, hay lands, Krasnoyarsk forest-steppe.

Введение. Во всех природных зонах сенокосные угодья имеют большое значение в общем балансе кормовой базы животноводства. Богатые по видовому составу травянистые сообщества являются источником ценных питательных веществ для животных, а также способствуют повышению качества животноводческой продукции. Бессистемное использование земель приводит к деградации травостоя, к подавлению развития ценных кормовых трав [1].

Согласно данным «Государственного доклада о состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае» за 2016 год, в структуре сельскохозяйственных угодий Красноярского края площадь сенокосов составляла 13,6 %. За последние 5 лет площадь указанных категорий земель снижается, что связано с их выведением в пользу жилой застройки, а также со снижением их продуктивности вследствие нерационального землепользования [2]. Определить степень нарушенности растительности возможно методом прямых наблюдений. Однако при больших площадях сенокосов, а также их территориальной удаленности проведение полевых работ может занимать достаточно много времени. Применение методов дистанционного зондирования Земли для идентификации сенокосов и оценки их состояния позволит своевременно диагностировать их деградацию и изменение площадей [3, 4].

Анализ публикаций на тему дистанционного исследования сенокосных угодий и их динамических характеристик в течение вегетационного сезона показывает, что этой проблеме посвящено значительно меньшее количество работ, чем вопросам изучения пастбищ [5, 6]. Большинство авторов рассматривают возможности применения спутниковых систем для изучения спектральных характеристик сельскохозяйственных угодий, в то время как наземная гиперспектральная съемка, в силу высокой стоимости приборной базы, практически не используется.

Цель исследований. Изучение структуры и спектральных характеристик травянистых растительных сообществ сенокосных земель Красноярского края по наземным данным.

Задачи исследований: определение и описание тестовых полигонов, пригодных для применения методов дистанционного зондирования Земли, а также определение спектральных ко-

эффициентов яркости растительности до и после сенокосения.

Объект и методы исследований. Объектом настоящего исследования являются травянистые растительные сообщества различного происхождения, расположенные в центральной части Красноярского края. Выбор тестовых участков обусловлен следующими критериями:

1. Размер тестового полигона должен обеспечивать возможность проведения большого количества спутниковых и наземных измерений

для получения статистически достоверного результата.

2. Растительность полигона должна быть травянистой, относительно однородной, периодически скашиваемой для сельскохозяйственных нужд.

В результате предварительного анализа спутниковых данных, а также проведенных в полевых условиях рекогносцировочных исследований было определено два тестовых участка, которые отвечают основным критериям отбора (рис. 1).



Рис. 1. Тестовые участки: участок 1 – Сухобузимский район (п. Борск); участок 2 – Емельяновский район (п. Минуно)

Участки располагаются в пределах Красноярской лесостепи. Красноярская лесостепь имеет прохладный режим погоды, достаточное увлажнение (гидротермический коэффициент (ГТК) 1,2–1,6). Характеризуется суммой температур за период с температурами выше +10 °С от 1400 до 1600 °С, осадки достигают за этот же период 160–210 мм, средняя многолетняя норма количества осадков составляет 488 мм. Период вегетации растений 130–150 дней, с температурой выше 10 °С продолжается 100–105 дней, безморозный период – 90 дней [7].

Основным методическим подходом при проведении исследований является комплексное использование наземной спектрометрии и геоботанических описаний.

1. **Наземное спектрометрирование.** Внутри-сезонные изменения спектральных характеристик растительных сообществ учтены и зафиксированы с помощью спектрометра Spectral Evolution PSR 1100F, который рассчитывает коэффициент спектральной яркости (КСЯ) объекта. КСЯ – это отношение яркости исследуемой поверхности в интервале длин волн к яркости идеально рассеивающей ортотропной поверхности в том же направлении, находящейся в тех же условиях освещения. Спектральные измерения проводились в период с 10 до 15 часов местного времени. При каждом измерении фиксировалась степень облачности в баллах. Географическая привязка территории выполнена с помощью системы GPS.

2. *Геоботанические исследования.* По традиционным методикам определена структура фитоценозов, проективное покрытие травостоя (общее и отдельных видов), жизненность видов, фенофаза, экологическая группа, эколого-фитоценотический тип [8]. Для верификации данных дистанционного зондирования в пределах каждой пробной площадки определена сырая надземная фитомасса. Для определения урожайности были взяты укосы с 1 м² (1 м x 1 м) в четырехкратной повторности. Все полученные результаты пересчитывались в г/м².

С целью достоверного определения изменения спектральных характеристик до и после сенокосения на тестовых участках проведены модельные опыты. На площадках размером 50x50 см в пятикратной повторности с помощью наземного спектрометра PSR 1100F снимались спектры общего вида растительности. Затем проводился срез надземных побегов до условной высоты сенокосения (5–7 см), после чего спектры снимались повторно. На следующем этапе оставшиеся побеги срезались полностью до уровня почвы и снимались спектры свободной от растений почвы. Параллельно определялись видовой состав, проективное покрытие, высота растений на срезаемых участках. Отбирались пробы для определения величины и структуры фитомассы.

Результаты исследований и их обсуждение. Травянистая растительность центральной части Красноярского края широко используется для сенокосения и выпаса скота. Характер использования участка земли зависит от того, каким комплексом природных условий он обладает [7, 9]. Имеет значение рельеф местности, удаленность от водоемов, лесов и населенных пунктов. В результате предварительного анализа спутниковой информации было выделено два участка различного происхождения, для которых характерно ежегодное периодическое скашивание.

Участок 1 расположен в Сухобузимском районе Красноярского края (N 56°25'11.19", E 92°54'31.85") в окрестностях п. Борска. Участок представляет собой равнинную местность со слабым уклоном на юг к пойменной части реки Бузим. Растительность территории имеет искусственное происхождение и представляет собой посев многолетних трав, предназначенных для сенокосения. Растительность пред-

ставлена разнотравно-злаковым сообществом и относится к лугово-степному типу. На момент наблюдений (конец июня) характерен серозеленый аспект. Общее проективное покрытие составляет 70 %. Доминантом является мезофит костер безостый *Bromus inermis* Leyss. со средней высотой генеративных побегов 90 см (проективное покрытие 40 %). Из разнотравья заметно участие звездчатки злаковидной *Stellaria graminea* L., смолевки белой *Melandrium album* (Mill.) Garcke. Доля бобовых составляет 5 % от общего проективного покрытия.

Участок 2 (N 56°3'56.37", E 92°39'22.04") расположен в Емельяновском районе в окрестностях п. Минуно на равнинном участке между малыми реками Бугач (на юге) и Пятково (на севере) в пределах Красноярской лесостепи. Участок представляет собой залежь, возраст которой не превышает 3 года. Территория относится к сенокосным землям. Горизонтальная структура травостоя мозаичная. Ценопопуляции располагаются вдоль борозд после последней вспашки полосами и пятнами. Общее проективное покрытие варьирует в пределах 65–85 % в зависимости от видового состава. Злаковую основу составляет мезофит пырей ползучий *Elytrigia repens* (L.) Nevski со средней высотой 75 см и проективным покрытием до 50 %. Доминирующее разнотравье представлено преимущественно сорными видами из семейств *Asteraceae* и *Brassicaceae*: бодяк полевой *Cirsium arvense* (L.) Scop., одуванчик лекарственный *Taraxacum officinale* F.H. Wigg., гулявник Лезеля *Sisymbrium loeselii* L. Из типично сорных видов также встречаются *Lappula echinata* Gilib. и *Linaria vulgaris* Mill. На участке отмечены монодоминантные полосы донника лекарственного *Mellilotus officinalis* (L.) Pall., горошка приятного *Vicia cracca* L. с проективным покрытием до 60 %, что существенно увеличивает кормовую ценность травостоя.

Выявленные различия в видовом составе и структуре травостоя участков исследования позволили идентифицировать их спектральные отличия. Внутрисезонные изменения спектральных индексов определены с помощью наземной спектрометрии. В результате проведенных полевых работ показано, что КСЯ различных растительных сообществ отличаются в зависимости от видового состава, вертикальной и горизонтальной структур травостоя.

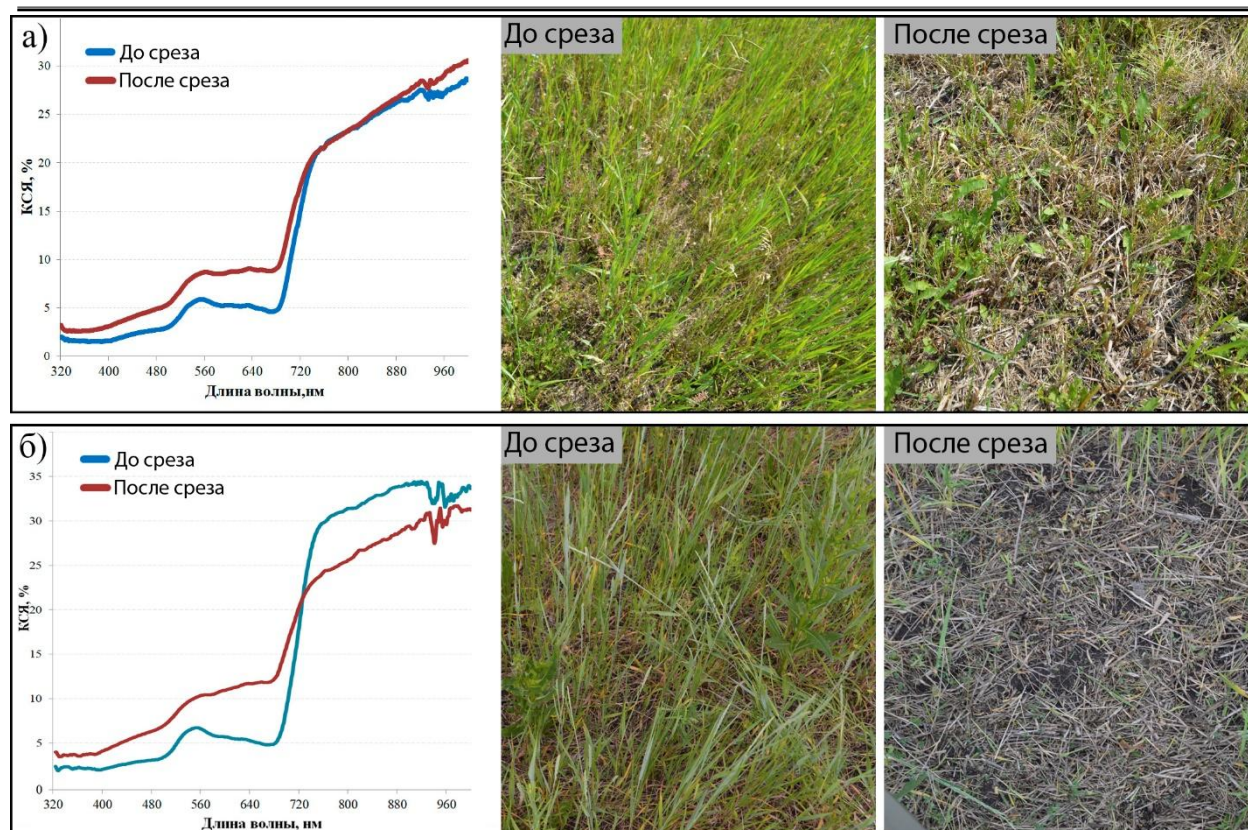


Рис. 2. Динамика КСЯ растительности на тестовых участках в окрестностях п. Борск (а) и п. Монино (б) до и после сенокосения

Спектры отражения травостоя до и после среза существенно отличаются по величине КСЯ и по форме спектра. Значения КСЯ в красном диапазоне (670–680 нм) в результате среза увеличиваются на 60–245 %. Причем наибольшие изменения соответствуют участкам, расположенным на пырейной залежи (п. Монино), – в среднем на 164 %; на участках п. Борск эта величина составляет 96 %. Это обусловлено тем, что общий объем сырой фитомассы на участках в д. Монино на 19,6 % больше, чем на участках п. Борск. Отметим, что значения отражения в красном диапазоне спектра определяются концентрацией хлорофилла, содержащегося в листьях растений.

В ближнем ИК-диапазоне (747–884 нм), отражающем структуру поверхности и содержание воды, в 7 случаях из 10 после среза значения КСЯ уменьшились на 34 % (см. рис. 2). В трех случаях изменения были незначительными – 1,7 %, что обусловлено особенностями данных тестовых участков – низким проективным покрытием, наличием растительности с широкой

листовой пластиной и их низкой высотой (до 5 см) (см. рис. 2).

Динамические изменения спектральных характеристик связаны с величиной накопления сырой надземной фитомассы.

С целью оценки функционального состояния растительных сообществ и их последующей идентификации с помощью наземных и спутниковых методов дистанционного зондирования определена сырая надземная фитомасса. Укосы отбирались одновременно с наземной съемкой, что позволило выявить спектральные отличия растительности до и после сенокосения.

На участке с посевом многолетних трав (п. Борск) за счет небольшой доли разнотравья в общем сложении фитомассы (около 20 %) общая продуктивность несколько ниже, чем на засоренной залежи в окрестностях п. Монино (табл.). Мозаичность структуры молодой залежи способствовала значительным колебаниям фитомассы в разных срезах. Так, фитомасса 3-го среза на 43 % состоит из высокопродуктивных бобовых, главным образом донника лекарственного. Развитые надземные органы домини-

рующих сорняков (высота 75–80 см) и высокое проективное покрытие (до 80 %) способствовали также формированию высокой продуктивности на 5-м срезе, где бодяк полевой, вьюнок полевой и донник лекарственный являются доми-

нантами. Их суммарная сырая фитомасса составляет 198,4 г/м². Широкая полоса пырея ползучего (4-й срез) формирует злаковую основу всей залежи, фитомасса которой составляет 92 % от общей продуктивности сообщества.

Величина надземной сырой фитомассы и ветоши сенокосных угодий, г/м²

Номер среза	п. Борск		п. Минино	
	Срез выше 5 см	Общая масса	Срез выше 5 см	Общая масса
Срез 1				
Сырая масса	369,6±12,3	540,5±20,2	533,5±21,3	569,7±23,5
Ветошь	5,6±0,8	112,0±11,6	10,8±2,1	154,0±12,3
Срез 2				
Сырая масса	505,9±15,8	585,5±18,4	484,7±15,6	501,0±26,8
Ветошь	16,8±3,2	135,9±15,3	15,4±3,2	195,6±21,3
Срез 3				
Сырая масса	489,8±18,2	544,2±11,8	625,8±20,8	694,0±23,3
Ветошь	34,4±9,3	129,6±8,9	57,6±15,3	298,4±18,6
Срез 4				
Сырая масса	543,4±12,8	573,5±22,3	850,9±32,5	896,5±38,5
Ветошь	22,8±5,3	133,3±11,8	26,4±10,3	160,0±23,2
Срез 5				
Сырая масса	480,0±16,5	519,2±12,6	731,6±30,2	772,6±25,3
Ветошь	17,2±5,1	68,3±10,6	31,2±8,6	264,0±18,4

На участке с посевом многолетних трав в окрестностях п. Борск величина сырой надземной фитомассы изменяется между срезами незначительно и составляет в среднем 552,5 г/м². Небольшие колебания продуктивности сообщества связаны главным образом с изменением высоты и проективного покрытия надземных органов доминанта костреца безостого.

Выводы. Проведенные исследования показывают, что рассмотренные сенокосные угодья Красноярской лесостепи существенно отличаются по видовому составу и структуре травостоя, что связано с различным происхождением. Условия увлажнения центральной части Красноярского края способствуют формированию продуктивных растительных сообществ с хорошо поедаемыми злаками-доминантами – кострецом безостым и пыреем ползучим. Продуктивность сырой массы варьирует в пределах 501–896 г/м². Площадь и характер растительности изученных сенокосных угодий позволяют использовать их в качестве тестовых полигонов

для проведения наземного и спутникового дистанционного мониторинга. В ходе проведенных наземных спектрометрических измерений показано, что спектры отражения травостоя до и после сенокоса существенно отличаются по величине коэффициента спектральной яркости. Полученные данные в дальнейшем будут использованы для верификации дистанционных данных различных спутниковых систем и построения карт распределения спектральных индексов на сенокосных землях Красноярского края.

Литература

1. Родионова А.В., Тебердиев Д.М. Продуктивность долголетнего сеяного сенокоса и плодородие дерново-подзолистых почв // Успехи современной науки. – 2017. – Т.1, № 10. – С. 178–183.

2. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае за 2016 год. – Красноярск, 2017.
3. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Уланова С.С. [и др.]. Наземные и спутниковые исследования продуктивности пастбищ Республики Калмыкии с различной степенью деградации растительных сообществ // Аридные экосистемы. – 2013. – Т. 19. – № 4 (57). – С. 31–39.
4. Botvich I. Yu., Shevyrnogov A.P. Agricultural Vegetation Phenology Monitoring by Modis Data Time Series Analysis // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2018. – V. 11(6). – P. 624–634.
5. Блохин Д.Ю., Незамов В.И. Оценка продуктивности пастбищ на землях лесного фонда при помощи материалов дистанционного зондирования Земли // Вестник КрасГАУ. – 2010. – № 5. – С. 24–28.
6. Терехин Э.А. Сезонная динамика NDVI многолетних трав и ее использование для типизации их посевов на территории Белгородской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12. – № 1. – С. 9–17.
7. Антипова Е.М. Флора внутриконтинентальных островных лесостепей Средней Сибири. – Красноярск, 2012. – 667 с.
8. Зоркина Т.М. Фитоценология: учеб.-метод. пособие. – Абакан: Изд-во ХГУ им. Н.Ф. Катанова, 2003. – 48 с.
9. Байкалова Л.П., Кожухова Е.В. Возделывание злаково-бобовых травосмесей как оптимизация урожайности среднесрочных сенокосов // Вестник КрасГАУ. – 2013. – № 5. – С. 68–74.

Literatura

1. Rodionova A.V., Teberdiev D.M. Produktivnost' dolgoletnego sejanogo senokosa i plodorodie dernovo-podzolistyh pochv // Uspehi sovremennoj nauki. – 2017. – T.1, № 10. – S. 178–183.
2. Gosudarstvennyj doklad o sostojanii i ohrane okruzhajushhej sredy v Krasnojarskom krae za 2016 god. – Krasnojarsk, 2017.
3. Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Ulanova S.S. [i dr.]. Nazemnye i sputnikovyje issledovanija produktivnosti pastbishh Respubliki Kalmykii s razlichnoj stepen'ju degradacii rastitel'nyh soobshhestv // Aridnye jekosistemy. – 2013. – T. 19. – № 4 (57). – S. 31–39.
4. Botvich I. Yu., Shevyrnogov A.P. Agricultural Vegetation Phenology Monitoring by Modis Data Time Series Analysis // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2018. – V. 11(6). – P. 624–634.
5. Blohin D.Ju., Nezamov V.I. Ocenka produktivnosti pastbishh na zemljah lesnogo fonda pri pomoshhi materialov distancionnogo zondirovanija Zemli // Vestnik KrasGAU. – 2010. – № 5. – S. 24–28.
6. Terehin Je.A. Sezonnaja dinamika NDVI mnogoletnih trav i ee ispol'zovanie dlja tipizacii ih posevov na territorii Belgorodskoj oblasti // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa. – 2015. – T. 12. – № 1. – S. 9–17.
7. Antipova E.M. Flora vnutrikontinental'nyh ostrovnyh lesostepej Srednej Sibiri. – Krasnojarsk, 2012. – 667 s.
8. Zorkina T.M. Fitocenologija: ucheb.-metod. posobie. – Abakan: lzd-vo HGU im. N.F. Katanova, 2003. – 48 s.
9. Bajkalova L.P., Kozhuhova E.V. Vozdelyvanie zlakovo-bobovyh travosmesej kak optimizacija urozhajnosti srednesrochnyh senokosov // Vestnik KrasGAU. – 2013. – № 5. – S. 68–74.