

УДК 528.854.4

# Параметрическое дешифрирование изображений пастбищ: опыт применения данных дистанционного зондирования низкого и среднего разрешения

Д.В. Малахов, А.Ф. Исламгулова\*

Департамент дистанционного зондирования Земли,  
АО «Национальный центр космических исследований и технологий»  
050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 15, Республика Казахстан

Поступила в редакцию 3.03.2014 г.

Рассмотрено применение различных вегетационных индексов для количественной оценки основных параметров пастбищных территорий (общего проективного покрытия, урожайности, содержания сорно-рудеральных видов растительности и степени деградации почвенно-растительного покрова) на основе спутниковых данных низкого и среднего пространственного разрешения. Для каждого вегетационного индекса была определена корреляция с соответствующими наземными параметрами. На основе индексов, имеющих хорошую корреляцию с наземными данными, разработан алгоритм комплексной оценки состояния пастбищ.

*Ключевые слова:* вегетационные индексы, общее проективное покрытие, урожайность, состояние пастбищ; vegetation index, grass-cover, productivity, pasture condition.

## Введение

Разработка методов дистанционной оценки состояния пастбищ и основных характеристик их качества является актуальной задачей ввиду обширных территорий, занимаемых различными типами пастбищ, которые невозможно охватить сетью регулярных наземных наблюдений. Алгоритмы количественной оценки состояния пастбищ, таких как продуктивность, урожайность, деградация, являются важным инструментом контроля и планирования рационального природопользования. В последние годы начинают развиваться методы дешифрирования лидарных и радиолокационных данных [1, 2], однако оптические системы дистанционного зондирования не утрачивают своей актуальности, а их данные в настоящий момент намного доступнее, чем данные лидарной и радарной съемок.

Казахстан традиционно является местом пастбищного животноводства. Природные пастбища являются важнейшим компонентом биосферы. Они не только обладают кормовыми ресурсами, но и опре-

деляют биологическое разнообразие флоры и фауны, а также качество среды обитания человека. Пастбищные экосистемы имеют важнейшее свойство – способность к ежегодному естественному самовозобновлению и самовоспроизводству растительной массы, сохранению и поддержанию почвенного плодородия.

## Материалы и методы

Исследования различных вегетационных индексов проводились на примере четырех спутниковых платформ (табл. 1).

В целях определения местоположения тестовых участков для проведения полевых наблюдений и наземного определения валовой (биологической) урожайности пастбищ были предварительно изучены многолетнее (с 2000 по 2012 г.) распределение и динамика индекса NDVI для степных, пустынных и полупустынных территорий Республики Казахстан по данным MODIS. Для анализа были использованы спутниковые снимки за май и июнь, т.е. сезон, соответствующий пику вегетации на данных территориях.

Таблица 1

Перечень спутниковых платформ для параметрического дешифрирования пастбищ

Область спектра	Landsat ETM+, мкм	Landsat OLI, мкм	DMC-2, мкм	TERRA/MODIS, мкм
BLUE	0,45–0,515	0,450–0,51	отсутствует	0,459–0,479
RED	0,63–0,690	0,64–0,67	0,63–0,69	0,620–0,670
NIR	0,75–0,90	0,85–0,88	0,77–0,90	0,841–0,876

\* Дмитрий Викторович Малахов (d\_malakhov\_73@mail.ru); Анастасия Фаритовна Исламгулова (aislamgulova@gmail.com).

Анализ сезонных изменений NDVI показал, что для условий пустынь и полупустынь многолетние значения данного индекса в период пика вегетации (вторая половина мая) не превышают 0,35. Это значение близко к порогу 0,25–0,3, начиная с которого NDVI распознает класс «разреженная растительность» [3]. Как неоднократно отмечалось в различных исследованиях, в силу своей привязанности к количеству фотосинтезирующей биомассы, NDVI не эффективен на снимках, полученных в сезон ослабленной или не вегетирующей в этот период растительности.

Кроме того, необходимо учитывать, что спектральный образ поверхности с редкой растительностью складывается, по существу, из двух величин – сигнала собственно зеленой биомассы (т.е. растительная составляющая) в ближнем ИК-диапазоне и сигнала обнаженных почв (преимущественно в красном диапазоне).

Для территорий, где естественный растительный покров является разреженным, целесообразно применение вегетационных индексов, в расчете которых учитывается влияние почвенной линии.

Почвенная линия – это гипотетическая линия в спектральном пространстве, которая описывает вариацию спектра открытой почвы на снимке. Линия может быть получена путем определения двух или более эталонов голый почвы на снимке, имеющих разное отражение, или нахождения наиболее подходящей линии в спектральном пространстве. Kauth и Thomas [4] описали знаменитый «треугольный регион в форме шапочки с кисточкой» (tasseled cup) в RED–NIR-спектральном пространстве данных MSS. Они обнаружили, что наивысшая точка треугольника (которая лежит в области низкого отражения в красной области спектра и высокого отражения в ближнем инфракрасном) соответствует районам с обильной растительностью, а плоская часть, лежащая напротив конца треугольника, соответствует голый почве. Пример вычисления почвенной линии приведен на рис. 1.

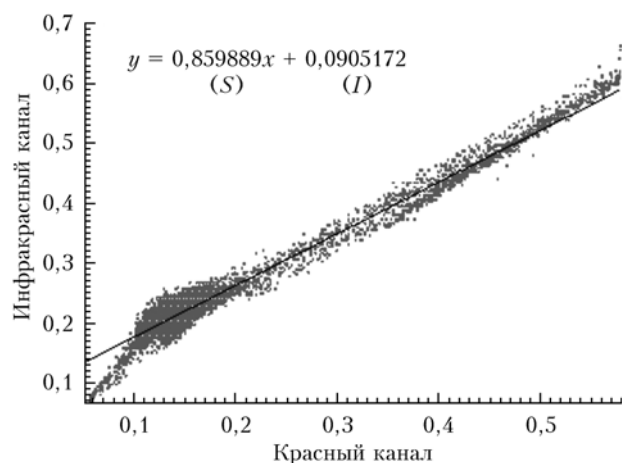


Рис. 1. Почвенная линия и ее уравнение, вычисленные в ENVI для участка с умеренным растительным покровом. Коэффициенты уравнения используются в формулах вегетационных индексов

Коэффициенты ( $S, I$ ), содержащиеся в уравнении почвенной линии, используются путем подстановки в соответствующие выражения вегетационных индексов (PVI, TSAVI и т.д.).

При камеральной работе для параметрического дешифрирования (т.е. определения количественных характеристик) использовались данные об общем проективном покрытии почвы растениями (ОПП), валовой урожайности, обилии (в %) сорных видов и степени антропогенной нарушенности почвенно-растительного покрова. Таким образом, в точках, фиксированных на местности прибором GPS, проводились детальное геоботаническое описание с использованием как традиционных методов полевых геоботанических исследований [5, 6], так и новых методических приемов [7–9] и определение валовой урожайности основных, преобладающих по площади типов пастбищ, а также спектрометрирование основных сообществ. В наших исследованиях мы оценивали спектральные образы растительности с помощью гиперспектрометра Field Spec, модель FieldSpec Hand Held (НН), спектрометр UV/VNIR (325–1075 нм). Основные типы пастбищ для полевых обследований были выбраны в результате предварительного экспертного дешифрирования космических снимков DMC и Landsat.

Для определения обилия (визуальная оценка количества особей каждого вида в сообществе) использовалась шкала Друде, которая сопряжена со шкалой проективного покрытия Браун–Бланке. Для более точной оценки общего проективного покрытия в пустынной местности мы применили, в дополнение к глазомерной оценке, метод линейного пересечения [10].

Для определения валовой (иначе биологической) урожайности использовался укосный метод [11].

Изучение степени деградированности почвенно-растительного покрова проводилось методом «антроподинамических рядов» [12]. При этом особое внимание уделялось фиксации видов индикаторов трансформации (сорно-рудеральные виды).

Основными признаками-индикаторами деградации растительности пустынь Казахстана служат: изменение структуры и состава растительности, ее полнотности и саморегуляции, снижение продуктивности и полноты использования ресурсов окружающей среды, нарушение экологических связей и несоответствие неустойчивых модификаций растительности среде обитания, уменьшение роли многолетников, появление сорных и ядовитых видов [13].

Для определения степени антропогенной нарушенности использовались критерии деградации растительного покрова по факторам изменения, основой которой послужили интегральные данные по факторам деградации [13], а также материалы по отдельным регионам Казахстана. По степени деградации растительности выделяются: фоновое состояние, слабая, средняя, сильная и очень сильная степени.

## Результаты исследования

Принципиальная схема параметрического дешифрирования пастбищных угодий представлена на рис. 2.

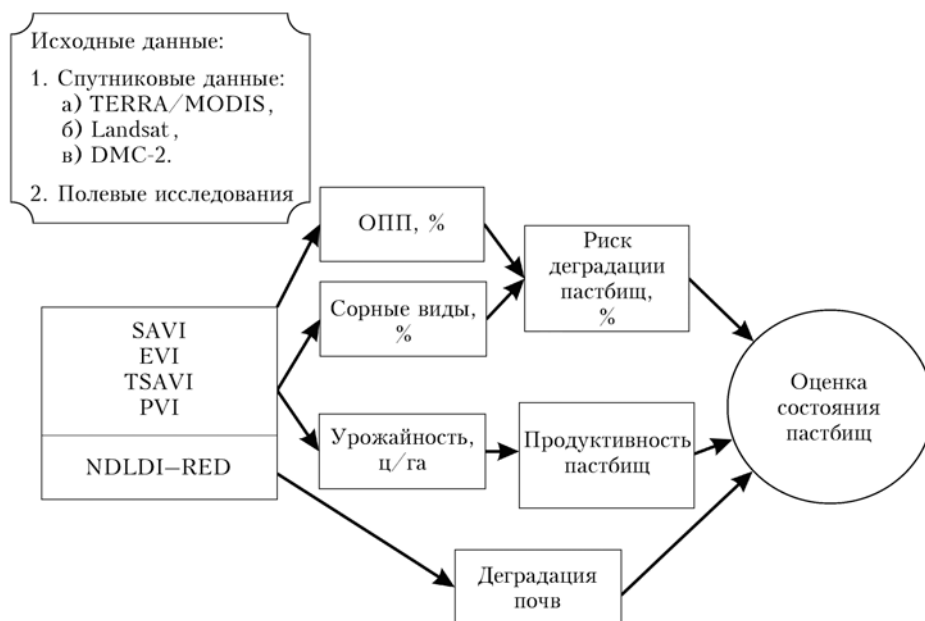


Рис. 2. Принципиальная схема параметрического дешифрирования пастбищ

Согласно разработанной методике параметрического дешифрирования пастбищных угодий на первом шаге исходные данные космосъемки проходят предварительную обработку, т.е. атмосферную коррекцию и, в случае данных со спутников DMC и Landsat, пересчет цифровых значений DN в коэффициенты спектрального отражения reflectance для каждого спектрального канала. Следующий этап – расчет специализированных индексов, являющихся основой определения базовых параметров оценки состояния пастбищ: SAVI, EVI, TSAVI, PVI, NDLDI-red [14–18].

Индексы вычисляются по следующим формулам:

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{(NIR + RED + b)(1 + b)}, \quad (1)$$

где RED, NIR – красный и ближний инфракрасный каналы спутникового изображения;  $b$  – поправочный коэффициент на влияние почвы, значения которого приняты как 1 для густого растительного покрова; 0,5 – для неизвестной обстановки или умеренного растительного покрова; 0,25 – для изреженной растительности;

$$EVI = \frac{NIR - RED}{NIR + (C_1 \cdot RED - C_2 \cdot BLUE + L)G}, \quad (2)$$

BLUE – синий канал спутникового изображения;  $L$  – поправка на плотность растительного фона;  $C_1$  и  $C_2$  – коэффициенты аэрозольной устойчивости, использующие синий канал для коррекции аэрозольного влияния в красном канале;  $G$  – коэффициент усиления. Значения коэффициентов для вычисления EVI приняты следующими:  $L = 1$ ;  $C_1 = 6$ ;  $C_2 = 7,5$ ;  $G = 2,5$ ;

$$TSAVI = \frac{S \cdot (NIR - S \cdot RED - I)}{S \cdot NIR + RED - SI + 0,8(1 + S^2)}, \quad (3)$$

$S$  и  $I$  – коэффициенты из уравнения почвенной линии для исследуемой местности (см. рис. 1);

$$PVI = \sin(S) \cdot NIR - \cos(S) \cdot RED; \quad (4)$$

$$NDLDI\_red = \frac{LDI_{TCW} - LDI_{NDVI}}{LDI_{TCW} + LDI_{NDVI}} RED, \quad (5)$$

$LDI_{TCW}$  и  $LDI_{NDVI}$  – индексы деградации почв согласно [19].

Затем, в зависимости от обрабатываемого типа спутникового изображения, выбираются формулы расчета базовых параметров, из которых складывается интегральная оценка состояния пастбищ. В целом оценка состояния пастбищ складывается из трех величин: продуктивности, степени деградации пастбищ и состояния почвенного покрова. Продуктивность (или сухой вес) напрямую взаимосвязана с урожайностью (рис. 3), которая коррелирует со спутниковыми вегетационными индексами.

Методика оценки деградации состоит в определении общего проективного покрытия территории и доли непоедаемых и сорных видов в общем ОПП [20]. Обе величины (ОПП и доля сорно-рудеральных видов) и степень деградации пастбищ выражены в процентах.

Еще одним фактором, определяющим состояние пастбищ, является нарушенность почвенного покрова, которая приводит к ухудшению плодородия почвы и, как следствие, к сокращению биомассы на этом участке. Существующие разработки по определению деградации почвенного покрова [19] не удовлетворяют следующим условиям: во-первых, не являются количественными, а во-вторых, в условиях пустынь и полупустынь не объективны. Нами разработан интегральный индекс оценки деградации почвенного покрова [18], позволяющий оценивать степень нарушенности почвенного покрова в процентах.

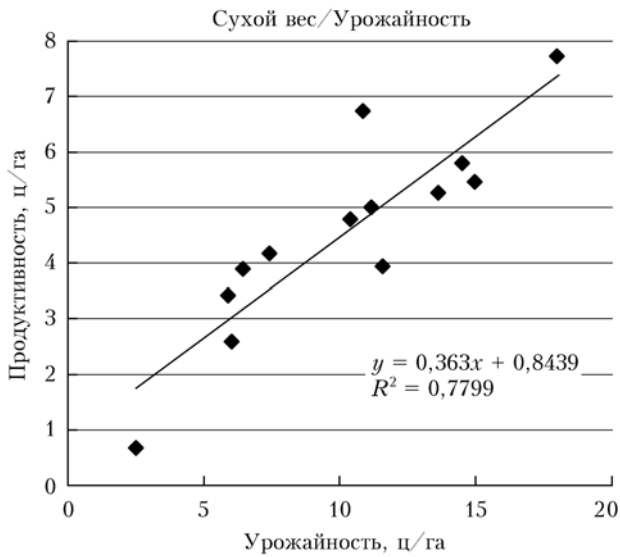


Рис. 3. Взаимосвязь урожайности и продуктивности

По результатам полевых исследований, в ходе которых весной и осенью 2013 г. на тестовых участках проведены измерения ОПП, урожайности, содержания сорно-рудеральных видов и дана экспертная оценка степени нарушенности почвенного покрова, изучены взаимосвязи наземных параметров с индексами отношений спектральных яркостей, рассчитанных для четырех спутниковых сенсоров: TERRA/MODIS, DMC-2, Landsat ETM+, Landsat OLI.

Результаты исследований показали разную степень корреляции между индексами, рассчитанными

для сенсоров различного пространственного разрешения, и наземными измерениями. Например, для данных низкого разрешения со спутника TERRA/MODIS корреляция, как правило, ниже. Такая взаимосвязь ограничивает применение данных низкого пространственного разрешения для оценки состояния пастбищ.

Данные среднего пространственного разрешения демонстрируют хорошую взаимосвязь вычисляемых индексов и наземных измерений. Следует заметить, что точность измерений отдельных параметров зависит от времени года. Так, ОПП точнее вычисляется в весенний сезон, когда доля отмерших частей растений нынешнего года еще невелика, а степень деградации почвенного покрова лучше оценивается в осенний период, когда становятся заметны результаты антропогенного и естественного воздействия на почвенно-растительный покров.

Среди рассматриваемых сенсоров DMC-2 имеет также ограниченное применение, поскольку, во-первых, у данного сенсора отсутствует синий канал, а во-вторых, корреляция индексов, вычисленных по DMC-2, не всегда столь же стабильно высока, как в случае с космическими снимками Landsat. Наилучшую взаимосвязь вычисляемых индексов и наземных наблюдений показали данные Landsat OLI.

Разработанный индекс нарушенности почвенно-растительного покрова хорошо работает на основе Landsat TM, Landsat ETM+ и Landsat OLI, позволяя выявлять постоянные очаги нарушенности, сезонные явления дефляции почв, связанные, например, с пересыханием временных водоемов (рис. 4), а также проводить количественную оценку степени нарушенности.

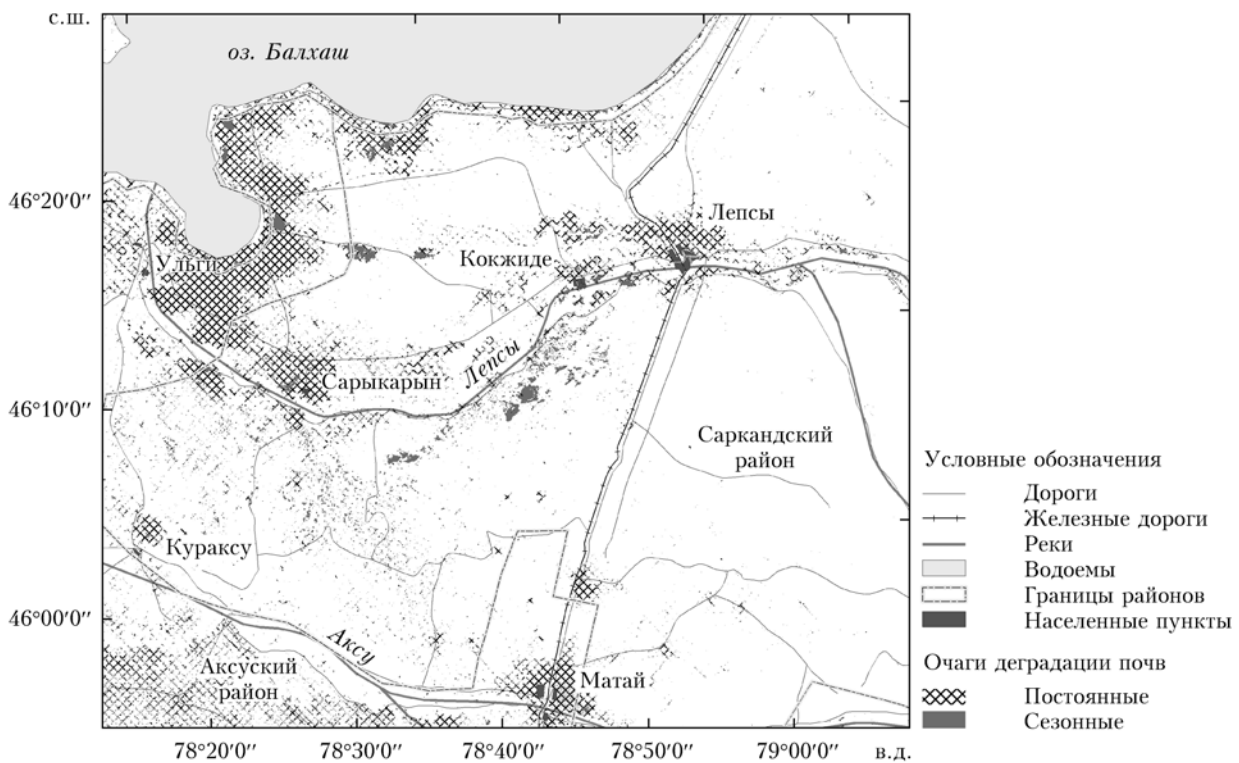


Рис. 4. Выявление постоянных и сезонных очагов нарушенности почвенно-растительного покрова по данным Landsat ETM+

## Обсуждение результатов

Для каждого спектрального индекса изучена корреляция расчетов данного индекса с результатами наземных измерений (табл. 2).

В таблице приведены те индексы, которые обнаружили положительную корреляцию с данными наземных исследований. Видно, что наименее выраженная корреляция расчетов с результатами наземных измерений наблюдается в случае со спутниковой

тального покрова. Данная методика не использует коммерческие спутниковые данные и может быть рекомендована в качестве основы для мониторинга и рекомендательной базы для устойчивого использования пастбищ.

Работы выполнены в рамках Республиканской бюджетной программы 002 «Прикладные научные исследования в области космической деятельности».

Авторы признательны сотрудникам Департамента дистанционного зондирования Земли Е.Н. Соловь-

Таблица 2

Корреляция спектральных индексов с наземными данными для различных платформ

Индекс	Исследуемый параметр	Тип спутниковых данных	Величина достоверности аппроксимации
SAVI	ОПП	TERRA/MODIS	0,45
SAVI	Урожайность	—>—	0,21
EVI	ОПП	—>—	0,45
EVI	Урожайность	—>—	0,20
EVI	Сорные виды	—>—	0,15
SAVI	ОПП	DMC	0,68
SAVI	Урожайность	—>—	0,66
EVI	ОПП	Landsat ETM+	0,81
TSAVI	Сорные виды	—>—	0,40
NDDLI_red	Деградация почвенно-растительного покрова	—>—	0,95
SAVI	ОПП	Landsat OLI	0,63
SAVI	Сорные виды	—>—	0,73
EVI	Урожайность	—>—	0,96
SAVI	—>—	—>—	0,96
NDDLI_red	Деградация почвенно-растительного покрова	—>—	0,86

информацией низкого пространственного разрешения (TERRA/MODIS, разрешение 1000 м).

Данные DMC имеют достаточно высокую корреляцию с наземными измерениями, но высокая стоимость данных DMC и отсутствие синего канала, делающего невозможным расчет индексов с его участием (в данном случае NDDLI-red и EVI), налагают серьезные ограничения на использование этого типа данных.

Landsat ETM+ и Landsat OLI показали хорошую корреляцию с результатами наземных измерений по всем изучаемым параметрам. Для данных платформ составлены корреляционные матрицы, показавшие, в частности, совпадение наземных данных и расчетов по спектральным индексам в 81% для ОПП (Landsat ETM+ и Landsat OLI, 59 наземных точек) и 88% для урожайности (Landsat ETM+ и Landsat OLI, 59 наземных точек).

## Заключение

В целом разработанная методика параметрического дешифрирования спутниковых данных обеспечивает высокую точность распознавания ключевых характеристик пастбищных угодий: общего проективного покрытия, урожайности, степени деградации пастбищ и степени нарушенности почвенно-расти-

тального покрова. Данная методика не использует коммерческие спутниковые данные и может быть рекомендована в качестве основы для мониторинга и рекомендательной базы для устойчивого использования пастбищ.

1. Бункин А.Ф., Бункин Ф.В. Лидарное зондирование водоемов, почвы и растительности // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13, № 1. С. 63–69.
2. Евтошкин А.В., Комаров С.А., Лукьяненко Д.Н., Миронов В.Л. Классификация земных покровов по радиолокационным изображениям // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10, № 12. С. 1508–1512.
3. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // Third ERTS Symposium. NASA SP-351 I. 1973. P. 309–317.
4. Kauth R.J., Thomas G.S. The Tasseled Cap – A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT // Proc. Sympos. on Machine Proc. of Remote Sens. Data, Purdue University of West Lafayette, Indiana. 1976. P. 4B-41–4B-51.
5. Полевая геоботаника. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1964. Т. 3. 531 с.; 1972. Т. 4. С. 137–330.
6. Отчет о НИР по теме: Антропогенная трансформация растительности Казахстана (заключительный) / Рук. Н.П. Огарь и Л.В. Шабанова. Алматы, 1996. 257 с.
7. Рачковская Е.И., Темірбеков С.С., Садовиков Р.Е. Использование дистанционных методов для оценки степени

- антропогенной трансформации пастбищ // Геоботаническое картографирование. СПб.: БИН РАН, 2000. С. 16–25.
8. *Бижанова Г., Курочкина Л.Я.* Антропогенные смены пастбищ Мойынкумов и их картографирование. Алма-Ата: Наука КазССР, 1989. 164 с.
  9. *Нурмухамбетова Г.Д.* Индикаторная роль сорной растительности в оценке процессов дигрессии и демуляции в степной зоне Казахстана // Изв. высш. шк. Сер. естеств. наук. 2001. № 2. С. 66–73.
  10. *Быков Б.А.* Геоботаника. Алма-Ата: Наука, 1978. С. 53–59.
  11. *Ларин И.В., Бегучев П.П., Работнов Т.А., Леонтьева И.П.* Луговое хозяйство и пастбищное хозяйство. Л.: Колос, 1975. 527 с.
  12. *Акиянова Ф.Ж., Курочкина Л.Я.* Опустынивание как процесс деградации земель. Алматы: Print-S, 2006. Т. 3. С. 197–254.
  13. *Марынич О.В.* Антропогенная трансформация степной растительности (на примере Центрального Казахстана): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Алматы, 1999. 29 с.
  14. *Huete A.R.* A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) // Remote Sens. Environ. 1988. V. 25. P. 295–309.
  15. *Huete A.R., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // Remote Sens. Environ. 2002. V. 83, N 1–2. P. 195–213.
  16. *Baret F., Guyot G., Major D.* TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI or APAR estimation // 12th Canadian Sympos. on Remote Sens. and IGARSS-1990. Vancouver, Canada. 1990. P. 10–14.
  17. *Richardson A.J., Wiegans C.L.* Distinguishing vegetation from soil background information // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1977. V. 43. P. 1541–1552.
  18. *Мячина К.В., Малахов Д.В.* Опыт применения данных дистанционного зондирования среднего пространственного разрешения для выделения объектов нефтепромыслов в условиях техногенно-модифицированного ландшафта (на примере Оренбургской области) // Изв. Самарского научного центра. 2013. Т. 15, № 3(7). С. 2341–2345.
  19. *Fadhil A.M.* Land Degradation Detection Using Geo-Information Technology for Some Sites in Iraq // J. Al-Nahrain Univ. 2009. V. 12, N 3. P. 94–108.
  20. *Liu Y., Zha Y., Gao J., Ni S.* Assessment of grassland degradation near Lake Qinghai, West China, using Landsat TM and in situ reflectance spectral data // Int. J. Remote Sens. 2004. V. 25, N 20. P. 4177–4189.

***D.V. Malakhov, A.F. Islamgulova. The quantitative interpretation of pasture image parameters: an experience of low and moderate spatial resolution remotely sensed data application.***

The application of vegetation indices for the quantitative evaluation of basic pasture parameters (grass-cover, productivity, unpalatable grass, pasture degradation) is discussed for low and moderate resolution optical sensors. Each vegetation index was correlated with ground-truth data. The algorithm of pasture condition estimation was developed using highly correlated indices.