
АТРОФ-МУҲИТ МОНИТОРИНГИ /
МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ /
ENVIRONMENTAL MONITORING

УДК 502:330.15

МОНИТОРИНГ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА
ПО ДАННЫМ NOAA/AVHRR

М.Л. АРУШАНОВ ^{1*}, Х.У. УМЕРОВ ¹

¹ Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, mikl-arushanov@rambler.ru

Аннотация. Данные о растительном покрове на огромных территориях невозможно получить на основе традиционных натурных измерений из-за отсутствия специализированной сети наблюдений. Точечные разновременные измерения параметров растительности не позволяют проследить за её динамикой, где не применим метод «от частного к общему». В этих условиях единственным источником информации о состоянии растительного покрова являются данные космической съёмки, которые дают возможность одновременно на больших площадях выполнять наблюдения за состоянием растительного покрова и периодически повторять эти наблюдения. Сохранение биологического разнообразия, обеспечения устойчивого состояния и научно обоснованного использования объектов растительного покрова возможно только при наличии оперативно действующего мониторинга растительности. В статье приводится описание разработанной технологии автоматизированного мониторинга растительного покрова на основе данных, доставляемых со спутника серии NOAA/AVHRR.

Ключевые слова: мониторинг, растительный покров, NOAA/AVHRR, отражательная способность, первичная обработка, тематическая обработка, вегетационные индексы, площадь растительного покрова.

Введение. До настоящего времени на территории Узбекистана отсутствует постоянно действующая сеть наблюдений за состоянием растительного покрова. Поэтому единственным источником информации для диагностики состояния растительного покрова являются данные дистанционного зондирования – спутниковые данные. Использование этих данных в целях мониторинга растительного покрова возможно только при наличии технологии автоматизированной системы диагностики растительности на спутниковом изображении. Реализация этой технологии в оперативном режиме возможна только при наличии станции приёма спутниковой информации. В Узгидромете такие станции имеются для приема данных с орбитальных спутников серии NOAA, MODIS и геостационарного спутника METEOSAT.

Начиная с 60-ых годов прошлого столетия, с момента развития нового направления в метеорологии «Спутниковая метеорология» [Герман, 1975, 1985; Кондратьев, 1986], накоплен богатый опыт интерпретации спутниковой информации в анализе атмосферных процессов, оценки состояния окружающей среды [Природа, 1984].

Исследование природных ресурсов Земли, в частности, растительного покрова, основано на измерении энергетических и поляризационных характеристик собственного и отражённого электромагнитного излучения исследуемых объектов атмосферы, подстилающей поверхности.

В целом система спутникового мониторинга природных ресурсов должна представлять multifunctionalную технологию с высоким уровнем автоматизации процессов приёма и обработки информации, доставляемой с борта искусственного спутника Земли (ИСЗ).

Целью работы является разработка технологии автоматизированной системы диагноза растительного покрова по данным спутниковой информации NOAA/AVHRR для его мониторинга в оперативном режиме.

Используемые данные. Изображения, полученные со спутника NOAA/AVHRR, захватывающие территорию Узбекистана, за период 2001-2020 годы (по 1-2 снимкам в месяц с апреля по ноябрь), сведённые в разработанную базу спутниковых данных и данные наземных измерений площади растительности в ботанико-географическом районе низовья Амударьи, представленные в работе [Кутлымуратова, 2023].

Физические аспекты дистанционного изучения растительного покрова. Диагностика растительного покрова по данным спутниковых измерений базируется на объективно существующих связях между параметрами растительности и полем её отражённого и собственного излучения [Кондратьев, Федченко, 1982]. Конечный результирующий сигнал (сформированное поле изображения), фиксируемый аппаратурой, установленной на спутнике, зависит от большого количества факторов. Поэтому решение обратной задачи – определение характеристик растительного покрова по данным взаимодействия электромагнитного поля с растительным покровом не всегда однозначно. Эта неоднозначность устраняется путём получения спектральных характеристик того или иного растительного вида путём выделения тестовых участков и получении коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) растительности на этих выделенных (эталонных) участках [Природа, 1984]. КСЯ определяется как отношение яркости уходящего излучения j^{\uparrow} от растительного покрова по направлению, определяемому углами θ , φ , к яркости j_{λ}^{\uparrow} рассеивающей одинаково по всем направлениям поверхности (ламбертова поверхность), находящейся в аналогичных условиях освещения:

$$КСЯ(\lambda, \theta, \varphi) = \frac{j^{\uparrow}}{j_{\lambda}^{\uparrow}}. \quad (1)$$

Здесь λ – длина волны, мкм.

КСЯ растительного покрова и его уровни яркости на спутниковом изображении в инфракрасной – NIR (0,7-1,0 мкм) и красной – RED областях (0,6-0,7 мкм) спектральных диапазонов длин волн связаны высокой корреляционной зависимостью [Рачкулик, Ситникова, 1981; Арушанов и др., 1999]. Такая же связь наблюдается между КСЯ и вегетационным индексом NDVI [Шинкаренко, Барталев, 2024].

Отношение показателей RED и NIR позволяет четко отделять и анализировать растительность от прочих природных объектов. Использование же не простого отношения, а нормализованной разности в виде вегетационного индекса NDVI

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2)$$

увеличивает точность измерения, позволяет уменьшить влияние таких явлений, как различия в освещенности снимка, некоторых видов облачности, дымки, поглощение радиации атмосферой и пр.

Области спектра NIR и RED наиболее стабильны (не зависят от прочих факторов). В красной области спектра лежит максимум поглощения солнечной радиации

хлорофиллом высших растений, а в инфракрасной области находится область максимального отражения клеточных структур листа. Иными словами, высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительности) ведет к меньшему отражению в красной области спектра и большему в инфракрасной. Характеристическая кривая отражательной способности растительности, как функция длины волны, приведена на рис. 1а. Там же приведена шкала NDVI (рис. 1б).

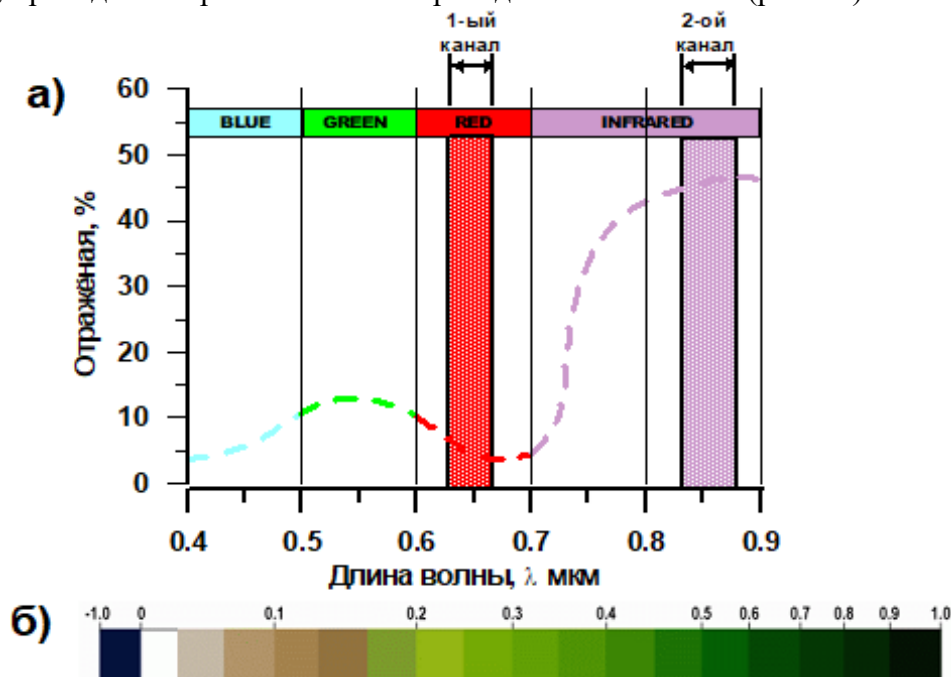


Рис. 1. Характеристическая кривая отражения растительности по данным NOAA/AVHRR (а) и шкала NDVI (б)

Fig. 1. Vegetation reflectance characteristic curve according to NOAA/AVHRR data (a) and NDVI scale (b)

Технология автоматизированного мониторинга растительности по данным ИСЗ. Мониторинг растительного покрова представляет собой систему наблюдений за состоянием объектов растительного мира и среды их произрастания, а также оценки их изменений в целях сохранения биологического разнообразия, обеспечения устойчивого состояния и научно обоснованного использования объектов растительного мира.

Отсутствие в Узбекистане с площадью 448900 км² постоянно действующей сети наблюдений за состоянием растительного покрова с одной стороны, и необходимость наличия мониторинга растительности, с другой стороны, указывают на то, что спутниковые данные являются единственным видом, на основании которых можно решить поставленную задачу.

Решение задачи разработки оперативного мониторинга растительного покрова разбивается на два основных блока: блок первичной обработки сканерных снимков с ИСЗ и блок тематической обработки. На рис. 2 приведена общая блок-схема автоматизированной системы мониторинга растительного покрова.

Первичная обработка. В процессе первичной обработки изображения из данных удаляются геометрические на кривизну Земли искажения, систематические радиометрические и, по возможности, атмосферные искажения. Все эти искажения устраняются модулями ГИС пакета ENVI – программное обеспечение для обработки и

анализа изображений, являющееся отраслевым стандартом и базовой технологией для анализа экосистем [ENVI, 2009].

Исключение искажений в изображении позволяет преобразовать его в форму, наиболее корректную для автоматизированного анализа, и используется для выделения наиболее информативных признаков исследуемого объекта на изображении и, как следствие, улучшить результаты тематической обработки.

Искажающее влияние атмосферы на результаты сканерных измерений с ИСЗ состоит в сложном преобразовании спектра отраженного и собственного излучения, изменении структуры поля уходящего излучения растительного покрова. В целом искажающее влияние проявляется в увеличении яркости темных объектов и уменьшении яркости светлых объектов. Учёт факторов, способствующих атмосферным искажениям, представляет собой сложную задачу, решение которой требует знания комплекса параметров атмосферы, влияющих на перенос излучения, а именно, химического состава, концентраций и функций распределения аэрозольных частиц по размерам, концентрации газовых компонентов атмосферы. Исследования в области атмосферной оптики, выполненные рядом учёных [Марчук, Михайлов, 1967], позволяют сделать вывод о возможности устранения указанного искажения на основе применения теории переноса излучения [Иванов, 1969].

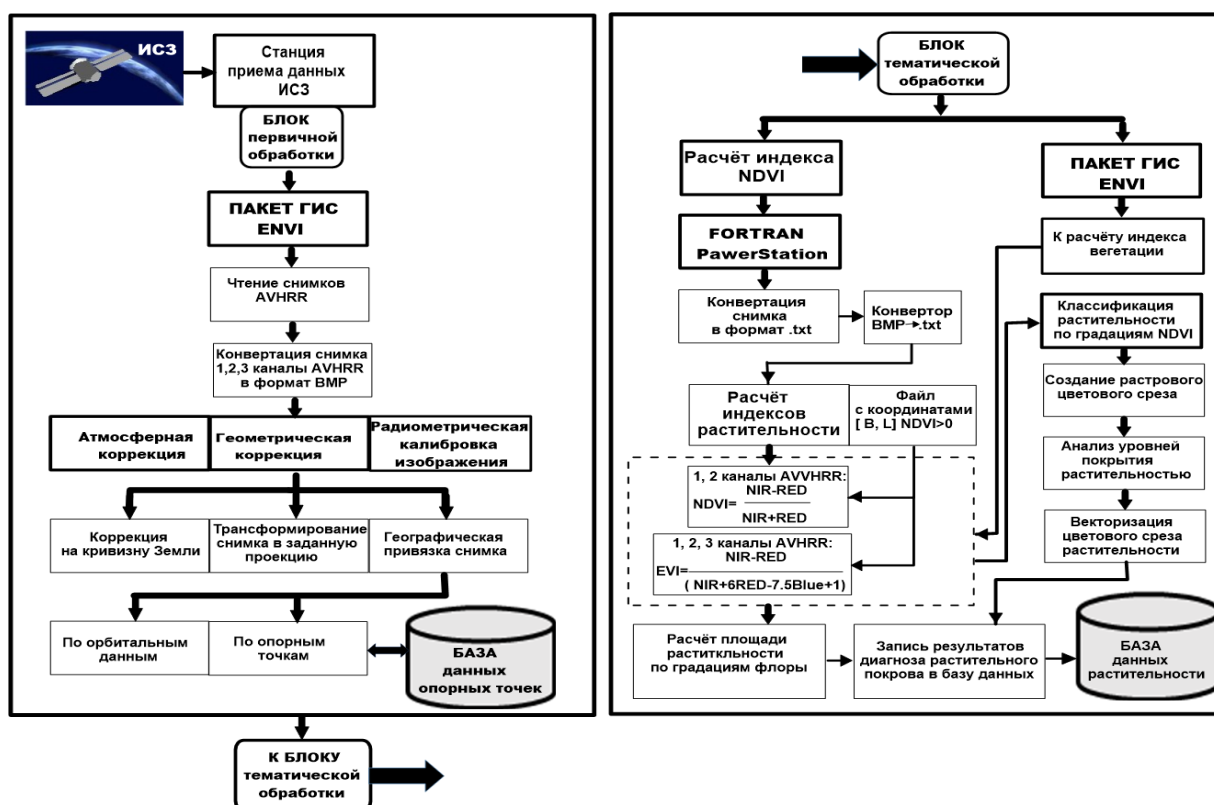


Рис. 2. Блок-схема технологии автоматизированного мониторинга растительного покрова по данным ИСЗ

Fig. 2. Block diagram of the technology of automated monitoring of vegetation cover based on satellite data

Трансформирование снимка в заданную картографическую проекцию. В результате трансформирования снимка в заданную картографическую проекцию достигается

пропорциональное соответствие размеров объектов на изображении и земной поверхности. В системе предусмотрены стереографическая и меркаторская проекции.

Географическая привязка пикселей изображения может выполняться двумя способами: по орбитальным данным [Герман, 1975, 1985] и по опорным точкам [Арушанов, 1994]. Сразу отметим, что точность привязки по орбитальным данным уступает таковой по опорным точкам в силу того, что в первом случае отсутствуют такие характеристики орбиты, как нутация и прецессия, необходимые в аналитических выражениях привязки по орбитальным данным. Результаты первичной обработки снимка представлены на рис. 3.

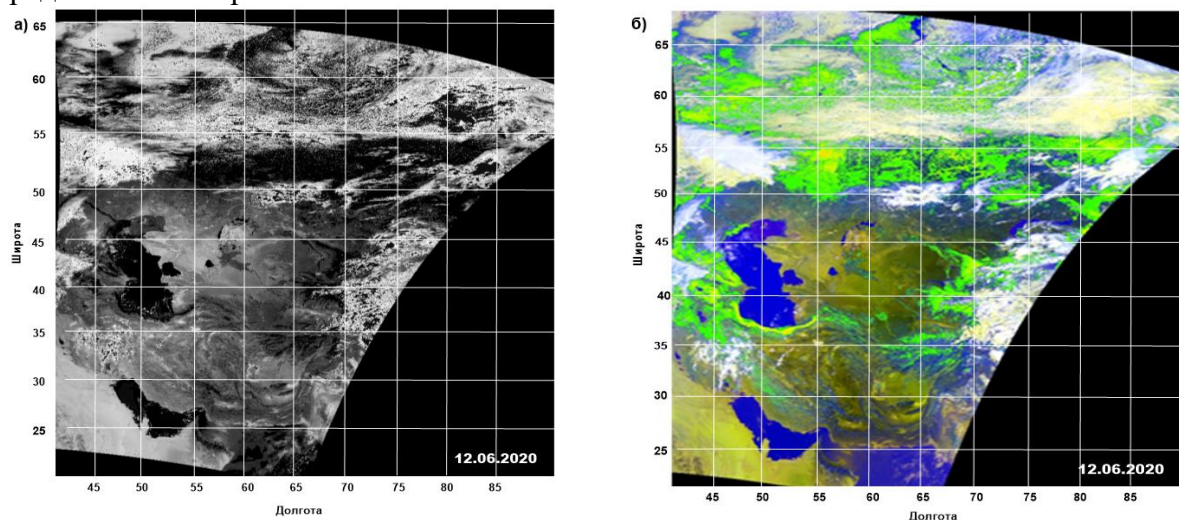


Рис. 3. Спутниковый снимок NOAA/AVHRR 12.06.2020 г. (1-ый канал), а) – прошедший первичную обработку; б) – синтезированный по трём каналам

Fig. 3. NOAA/AVHRR satellite image 12.06.2020 (1 channel), а) after primary processing; б) – zzzsynthesized from three channels

Тематическая обработка. Апробация технологии автоматизированного диагноза растительного покрова в целях его мониторинга была выполнена на спутниковых снимках, включённых в базу данных.

После расчета индекса NDVI (рис. 4) согласно блок-схеме, представленной на рис. 2 (блок тематической обработки), выполняется классификация по градациям NDVI. Для этого реализуется процедура построения «*Растрового цветного среза*» [ENVI, 2009] по заданному числу классов. Принимая во внимание шкалу NDVI (рис. 16) количество классов задавалось 16. Результаты выполнения данной процедуры приведены на рис. 5. На этом же рисунке приведена гистограмма распределения NDVI.

Площадь S_i , занятая растительностью, вычисленной по значениям вегетационного индекса $NDVI > 0.07$, рассчитывается по количеству пикселей N_i для данной градации принятого ботанико-географического районирования (рис. 6), умноженному на размер пикселя, соответствующий пространственной разрешающей способности аппаратуры NOAA/AVHRR, т.е.

$$S_i = 1,1 \times 1,1 \times N_i \text{ км}^2 = S_i \times 100 \text{ га}, \quad (i=1, 2, 3, 4). \quad (3)$$

В нашем случае, по указанной в сноске причине, площадь растительного покрова вычислялась для района низовья Амурда (рис. 6, $i=3$).

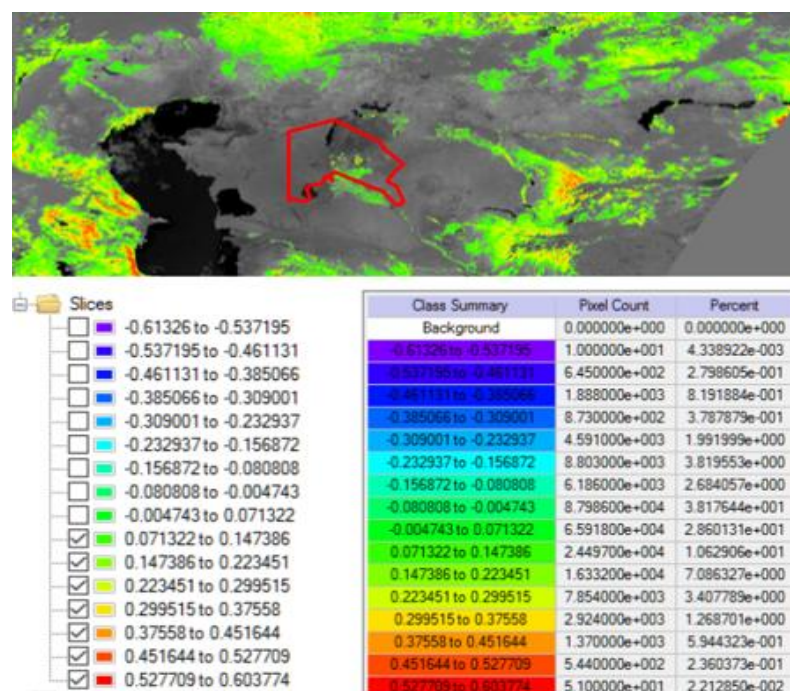


Рис. 4. Распределение NDVI по фрагменту снимка AVHRR 12.06.2020 г.
Примечание: красным контуром выделена граница Республики Каракалпакстан*. «Птичкой» в шкале «Slices» отмечены значения NDVI, принадлежащих классу «растительность».

Fig. 4. NDVI distribution for a fragment of the AVHRR image 12.06. 2020.
Note: the border of the Republic of Karakalpakstan is outlined in red.
 The "bird" in the "Slices" scale marks the NDVI values belonging to the "vegetation" class.

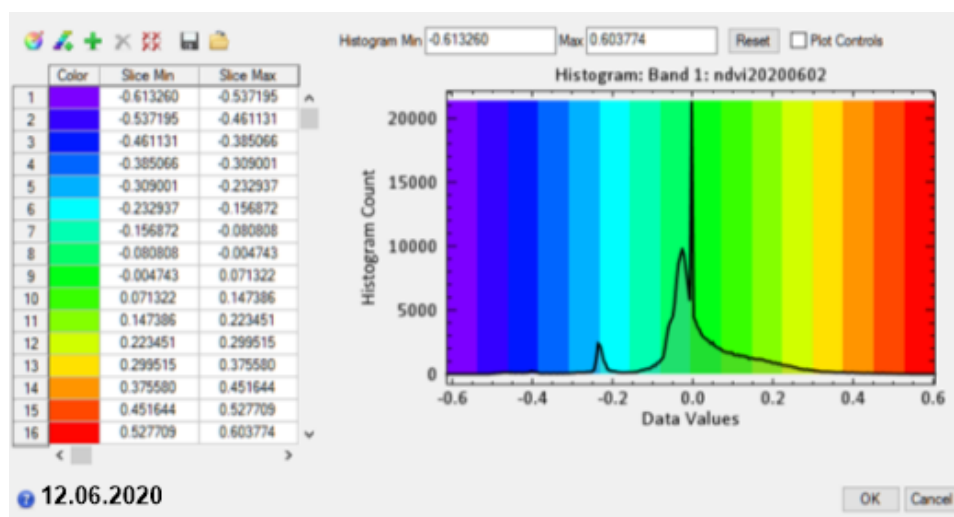


Рис. 5. Растровый цветной срез NDVI снимка NOAA/AVHRR 12.06.2020 г., построенный по 16 классам и гистограмма распределения NDVI

Fig. 5. Raster color slice of NDVI of the NOAA/AVHRR image of 06.12.2020, constructed according to 16 classes and a histogram of NDVI distribution

* Граница выделена, т.к. валидация оценки площади растительного покрова, вычисленной по значениям NDVI, выполнялась по имеющимся натурным данным для низовья Амударьи Каракалпакстана [Кутлымуратова, 2023].

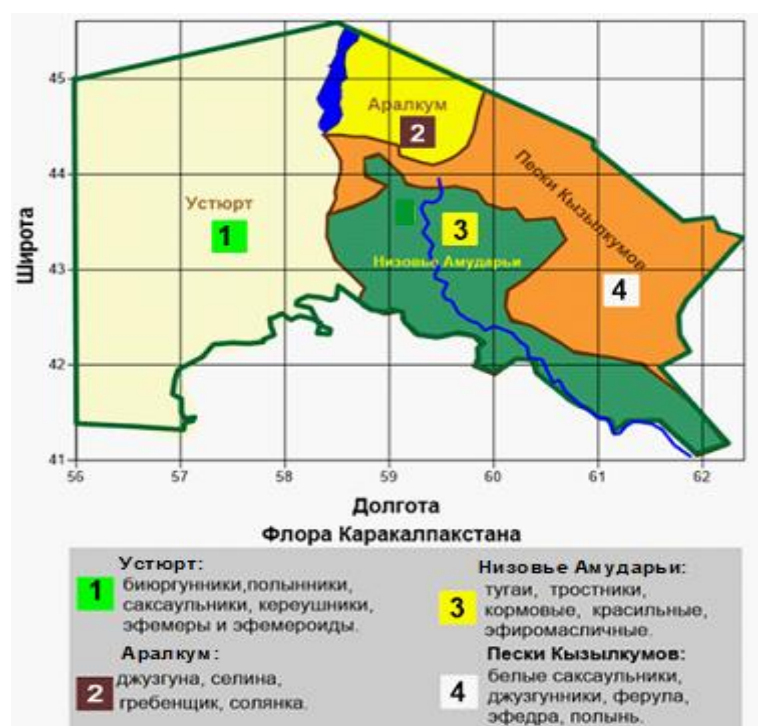


Рис. 6. Ботанико-географическое районирование Каракалпакстана [Атлас, 2009].

Fig. 6. Botanical and geographical zoning of Karakalpakstan [Atlas, 2009].

На рис. 7 приведены рассчитанные площади биомассы в июне месяце для указанного ботанико-географического района по данным спутниковых снимков NOAA/AVHRR за период 2001-2020 годы. На этом же рисунке приведен график динамики площади, занятой тугайными видами растительности, построенный по натурным данным из работы [Кутлымуратова, 2023] за период 1960-2000 годы. Авторы этой работы площади с тугаем относительно всей биомассы Низовья Амударьи оценивают в 67%. Оказалось, что график изменения площади под тугайными видами растительности с высокой точностью аппроксимируется полиномом 7-ой степени с коэффициентом детерминации

$$R^2 = 0,996; S = 3,417 \cdot 10^{17} - 1,196 \cdot 10^{15} \cdot Y + 1,795 \cdot 10^{12} \cdot Y^2 - 1,496 \cdot 10^6 \cdot Y^3 + 7,486 \cdot 10^2 \cdot Y^4 - 224,656 \cdot Y^5 + 0,037 \cdot Y^6 - 2,67610^{-6} Y^7, \quad (4)$$

где предиктор Y – год.

Как следует из рис. 7, качественно графики динамики площади под тугайной растительностью, полученные экстраполяцией полиномом натурных данных на 2001-2020 годы и рассчитанные по данным спутниковой информации, достаточно близки. По абсолютным значениям они также не сильно отличаются несмотря на то, что этому отличию способствуют множество очевидных факторов. В целом, результаты диагностики растительного покрова по спутниковым снимкам с удовлетворительной точностью воспроизводят его динамику.

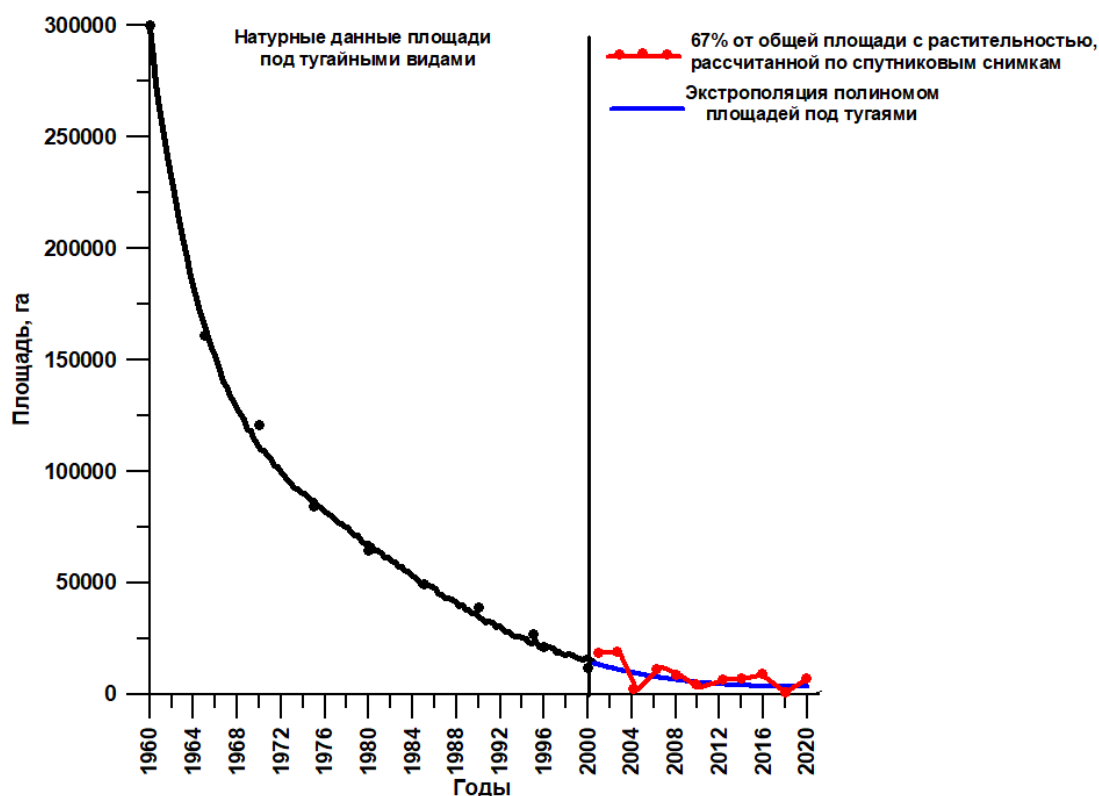


Рис. 7. Площади, занимаемые тугайной растительностью на территории Каракалпакстана в низовье Амударьи, по натурным данным (1960-2000 гг.) и рассчитанные по спутниковым снимкам NOAA/AVHRR (2001-2020 гг.)

Fig. 7. Areas occupied by tugai vegetation in the territory of Karakalpakstan in the lower reaches of the Amu Darya, according to field data (1960-2000) and calculated from NOAA/AVHRR satellite images (2001-2020)

Выводы. Представленная в данной статье технология автоматизированного мониторинга растительного покрова, базирующаяся на спектральных данных дистанционного зондирования, на основе выполненной валидации на этапе апробации системы, позволяет сделать вывод о её работоспособности в оперативном режиме и может быть использована в отделе агрометеорологии Узгидромета и других заинтересованных организациях.

Благодарности. Данное исследование выполнено в рамках гранта IL-5221091475 «Инновационные технологии оценки и мониторинга ресурсного потенциала растительности Каракалпакстана», финансируемого Каракалпакским региональным управлением Агентства инновационного развития Республики Узбекистан.

Вклад авторов. **М.Л. Арушанов:** разработка технологии автоматизированного мониторинга по данным спутниковой информации, редакция статьи, **Х.У. Умеров:** написание текста, разработка скриптов и численные расчёты в оболочке ГИС пакета ENVI. Все авторы прочитали и согласны с подготовленной к публикации версией рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

- Арушанов М.Л. Простая модель географической привязки сканерных снимков малого разрешения, обеспечивающая высокую точность // Исследование Земли из космоса, 1994. № 3. – С. 41-46.
- Арушанов М.Л., Ситникова М.В., Сумочкина Т.Е. Оценка состояния почвеннорастительных объектов пустынных территорий по данным NOAA-AVHRR // Труды УСОИ, 1999. – Вып. 1. – С. 117-130.
- Атлас биоразнообразия Каракалпакстана. Высшие растения, позвоночные животные. – Ташкент: Проект ПРООН, ГЭФ, 2009. – 114 с.
- Герман М.А. Космические методы исследования в метеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 225 с.
- Герман М.А. Спутниковая метеорология. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 368 с.
- Иванов В.В. Перенос излучения и спектры небесных тел. – М.: Наука, 1969. – 472 с.
- Кондратьев К. Я. Спутниковая климатология. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 263 с.
- Кондратьев К.Я., Федченко И.П. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 226 с.
- Кутлымуратова А.Г. Оценка продуктивности тугайной растительности в низовьях Амударьи // Химия и биология, 2023. – №5 (107). – С. 11-15.
- Марчук Г.И., Михайлов Г.А. О решении задач атмосферной оптики методом Монте-Карло // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана, 1967. – Т. 4. – С. 258-273.
- Природа Земли из космоса. /под редакцией д.т.н. Козлова Н.П.– Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 151 с.
- Рачкулик В.И., Ситникова М.В. Отражательные свойства и состояние растительного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 287 с.
- Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Анализ взаимосвязи структурных и спектрально-отражательных характеристик растительности аридных пастбищных ландшафтов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2024. – Т. 21. № 3. – С. 171–187.
- ENVI Programmer's Guide. – New York: Research Systems, 2009. – 174 с.

NOAA/AVHRR МАЪЛУМОТЛАРИ БЎЙИЧА ЎСИМЛИК ҚОПЛАМИ
МОНИТОРИНГИМ.Л. АРУШАНОВ¹, Х.У. УМЕРОВ¹¹ Гидрометеорология илмий-тадқиқот институти, mikl-arushanov@rambler.ru

Аннотация. Ихтисослашган кузатув тармоғи йўқлиги сабабли катта ҳудудларда ўсимлик қоплами тўғрисида маълумотларни анъанавий дала ўлчовлари асосида олиб бўлмайди. Турли вақт моментларида ўсимлик параметрларининг нуқтавий ўлчовлари унинг динамикасини кузатиши имконини бермайди, яъни «хусусийдан умумийга» усулини қўллаб бўлмайди. Бундай шароитда ўсимлик қопламининг ҳолати тўғрисида ягона маълумот манбаи – сунъий йўлдош тасвирлари маълумотлари бўлиб, бу бир вақтнинг ўзида катта майдонларда ўсимлик қопламининг ҳолатини кузатиши ва бу кузатишларни даврий такрорлаш имконини беради. Биологик хилма-хилликни сақлаш, барқарор ҳолатни таъминлаш ва ўсимлик қоплами объектларидан илмий асосланган фойдаланиш фақат ўсимликларнинг оператив мониторинги мавжуд бўлганда мумкин. Мақолада NOAA/AVHRR сунъий йўлдошидан олинган маълумотлар асосида ўсимлик қопламининг автоматлаштирилган мониторинги учун ишлаб чиқилган технология тавсифи келтирилган.

Калит сўзлар: мониторинг, ўсимлик қоплами, NOAA/AVHRR, қайтариши қобилияти, бирламчи қайта ишлов, мавзули қайта ишлов, вегетация индекслари, ўсимлик қоплами майдони.

VEGETATION COVER MONITORING BASED ON NOAA/AVHRR DATA

M.L. ARUSHANOV¹, Kh.U. UMEROV¹¹ Hydrometeorological Research Institute, mikl-arushanov@rambler.ru

Abstract. *Data on vegetation cover over vast territories cannot be obtained based on traditional in-kind measurements due to the lack of a specialized observation network. Point measurements of vegetation parameters at different times do not allow tracking its dynamics, where the “from the particular to the general” method is not applicable. Under these conditions, the only source of information on the state of vegetation cover is space imagery data, which makes it possible to simultaneously monitor the state of vegetation cover over large areas and periodically repeat these observations. Conservation of biological diversity, ensuring a sustainable state and scientifically based use of vegetation cover objects is possible only with the availability of operational vegetation monitoring. The article describes the developed technology of automated monitoring of vegetation cover based on data delivered from the NOAA/AVHRR series satellite.*

Keywords: *monitoring, vegetation cover, NOAA/AVHRR, reflectivity, primary processing, thematic processing, vegetation indices, vegetation area.*

REFERENCES

- Arushanov M.L. Prostaya model geograficheskoy privyazki skanernykh snimkov malogo razreshniya, obespechivayushaya visokuyu tochnost [Simple model of georeferencing of low-resolution scanner images providing high accuracy] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1994. No. 3. – S. 41-46. (in Russian)
- Arushanov M.L., Sitnikova M.V., Sumochkina T.E. Ocenka sostoyaniy pochvennorastitelnykh obektov pustynnykh territoriy po dannym NOAA/AVHRR [Assessment of the state of soil and vegetation objects of desert territories according to NOAA-AVHRR data] // *Trudy USOI*, 1999. – Vip. 1. – S. 117-130. (in Russian)
- Atlas bioraznobraziya Karakalpakstana. Vysshie rasteniya, pozvoyochnyae jivotnye [Atlas of Biodiversity of Karakalpakstan. Higher plants, vertebrates]. – Tashkent: Proekt PROON, GEF, 2009. – 114 s. (in Russian)
- German M.A. Kosmicheskie metody v meteorologii [Space research methods in meteorology]. – L.: Gidrometeoizdat, 1985. – 225 s. (in Russian)
- German M.A. Sputnikovaya meteorologiya [Satellite meteorology]. – L.: Gidrometeoizdat, 1975. – 368 s. (in Russian)
- Ivanov V.V. Perenos izlucheniya v spektre nebesnykh tel [Radiation transfer and spectra of celestial bodies]. – M.: Nauka., 1969. – 472 s. (in Russian)
- Kondratiev K.Ya. Sputnikovaya klimatologiya [Satellite climatology]. – L.: Gidrometeoizdat, 1986. – 263 s. (in Russian)
- Kondratiev K.Ya., Fedchenko I.P. Spektralnaya otrajatel'naya sposobnost i raspoznavanie rastitelnosti [Spectral reflectivity and vegetation recognition]. – L.: Gidrometeoizdat, 1982. – 226 s. (in Russian)
- Kutlymuratova A.G. Ocenka productivnosti tugainoy rastitelnosti v nizove Amudari [Assessment of tugai vegetation productivity in the lower reaches of the Amu Darya] // *Himiya i biologiya*, 2023. No. 5 (107). – S. 11-15. (in Russian)
- Marchuk G.I., Mikhailov G.A. O reshenii zadach atmosferno optiki metodom Monte-Karlo [On the solution of atmospheric optics problems by the Monte Carlo method] // *Izv. AN SSSR. Ser. Fizika atmosfery i okeana*, 1967. – T. 4. – S. 258-273. (in Russian)
- Priroda Zemli iz kosmosa [The nature of the Earth from space]. – L.: Gidrometeoizdat, 1984. – 151 s. (in Russian)

Rachkulik V.I., Sitnikova M.V. Otrajatelnye svoystva rastitelnogo pokrova [Reflective properties and state of vegetation cover]. – L.: Gidrometeoizdat, 1981. – 287 s. (Russian)

Shinkarenko S.S., Bartalev S.A. Analiz vzaimosfyazi strukturnykh i spektralno-otrajatelnykh harakteristik rastitelnosti aridnykh pastbichnykh landshaftov [Analysis of the relationship between structural and spectral-reflective characteristics of vegetation in arid pasture landscapes] // *Sovremennye problemi distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024. – T. 21. No. 3. – S. 171-187. (in Russian)