

УДК 528.856:630*5

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-106-115

АЛГОРИТМ И ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОЩАДИ ЛЕСНОГО ПОКРОВА ХАЧМАЗСКОГО РАЙОНА АЗЕРБАЙДЖАНА СРЕДСТВАМИ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В.М. Мамедалиева, канд. геогр. наук; ResearcherID: AAC-5454-2021,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8775-8564>

Институт экологии Национального аэрокосмического агентства, ул. С.С. Ахундова, д. 1, г. Баку, Азербайджан; e-mail: valide.mamedaliyeva@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты многолетних наблюдений за состоянием лесного покрова Хачмазского р-на Азербайджана. При этом учитывались как результаты дистанционного зондирования Земли, так и данные более старых наблюдений, полученных путем натурного мониторинга и сохраненных в виде тематических карт на бумажных носителях. Результаты дистанционного зондирования содержали мультиспектральные спутниковые изображения за несколько лет. С помощью программы QGIS и плагина Semi-Automatic Classification Plugin проводили предварительную обработку изображений, включающую радиометрическую и атмосферную коррекцию, а также классификацию участков исследуемого района по типу покрытия земной поверхности на основе анализа их спектральных кривых. Согласно классификации определялись площади, занимаемые лесными массивами. В совокупности наблюдений включались данные из имеющихся архивных материалов – тематических карт Хачмазского р-на. Для их обработки и извлечения данных о площади лесных массивов в среде MATLAB разработана программа. Алгоритм программы обработки включает проведение гистограммного анализа изображения в целом и отдельно легенды. По гистограмме легенды определяется число тематических слоев карты, но в их число не включаются слои, содержащие неиспользуемые цвета, обозначающие соседние районы, участки моря и др. Затем проводится цветовая коррекция пикселей изображения (квантование цветов по числу тематических слоев), морфологическая обработка и осуществляется расчет числа пикселей каждого слоя и всех слоев вместе. По полученным соотношениям рассчитывается площадь каждого слоя. Данные обработки архивных материалов вместе с результатами дистанционного зондирования сводятся в общую таблицу, с использованием которой строится диаграмма изменения площади леса, а также модель в виде полинома, отражающего эту динамику. Анализ диаграммы выявил тенденцию к уменьшению площади лесов: за 7 лет – на 21 %. Разработанный алгоритм проводит разбивку тематических карт на отдельные слои в соответствии с цветами легенды.

Для цитирования: Мамедалиева В.М. Алгоритм и оценка изменения площади лесного покрова Хачмазского района Азербайджана средствами космического мониторинга // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 106–115. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-106-115

Ключевые слова: лесной покров, площадь, динамика изменений, Хачмазский р-н, электронные карты, тематический слой, обработка изображений.

Введение

В число приоритетных направлений развития лесной науки входит разработка и применение моделей кратко-, средне- и долгосрочного прогнозирования

динамики лесов в условиях комбинированного действия антропогенных и природных факторов [5]. Ведущими факторами для леса являются тепло и осадки. Проявляется также влияние рельефа, почвы, локальных особенностей климата и др. [4].

Изменение лесов – очень динамичный и непрерывный процесс, имеющий множество аспектов, часто находящийся во взаимодействии и взаимозависимости с другими формами землепользования, производством продовольствия и климатическими системами. Эта сложность до сих пор полностью не изучена [17].

В настоящее время в лесоведении, как и в других областях научных исследований, широкое распространение получили географические информационные системы (ГИС), дающие широкие возможности обработки больших объемов географических данных и позволяющие создавать самые разнообразные тематические слои электронных карт. Однако ГИС существовали не всегда, в архивах и сейчас имеется большое количество созданных вручную различных тематических карт на бумажных носителях. Эти карты содержат ценную информацию, владение которой позволяет оценивать динамику многих процессов, решать другие задачи. Большинство систем мониторинга и сбора данных основаны на сочетании наземных измерительных экспериментов, аэро- или спутниковых наблюдений [18].

Одной из глобальных задач становится оценка состояния лесного покрова – легких Земли. Леса являются важнейшим условием поддержания всей экосистемы на планете, что обуславливает необходимость выработки прогнозных оценок их состояния [1, 21]. Изучение лесного покрова включает не только получение информации о его количестве, особенно важна возможность проведения моделирования. Компьютерные средства позволяют получить модель как функцию от одного или нескольких аргументов, а в качестве исходных данных использовать самые различные источники. Моделирование зависимости площади лесов от антропогенных факторов – одно из приоритетных направлений исследований, поскольку рост населения в последние десятилетия приводит к увеличению масштабов уничтожения лесов [19].

Цель исследования – на примере Хачмазского района Азербайджана изучить динамику изменения лесных массивов с учетом результатов многолетних наблюдений, в том числе данных спутниковых съемок и архивных материалов, представленных в виде табличных данных или тематических карт на бумажных носителях.

Объекты и методы исследования

Хачмазский район – один из северных районов Азербайджана – занимает территорию 1 063 км², граничит с Российской Федерацией, располагаясь на западном побережье Каспийского моря, севернее хребта Большой Кавказ. Ландшафт района включает горные, равнинные и низменные участки и следующие природные зоны: лес, степь, пустыню. Развито сельское хозяйство [6, 7].

Для исследования использовались тематические карты, сделанные в 1987 и 2011 гг. Путем сканирования они переводились в электронный формат и сохранялись отдельными файлами в виде рисунков с расширением jpg. На картах различными цветами помечены участки земли, занимаемые лесами,

сельскохозяйственными культурами и др. Прилагались «легенды», т. е. пояснения, каким цветам соответствуют различные типы земельных участков. Требовалось определить площадь, занимаемую их различными типами. С этой целью была разработана специальная программа в среде MATLAB, использовались функции набора инструментов для обработки изображений Image Processing Toolbox [15]. На рис. 1 приводится алгоритм работы программы.

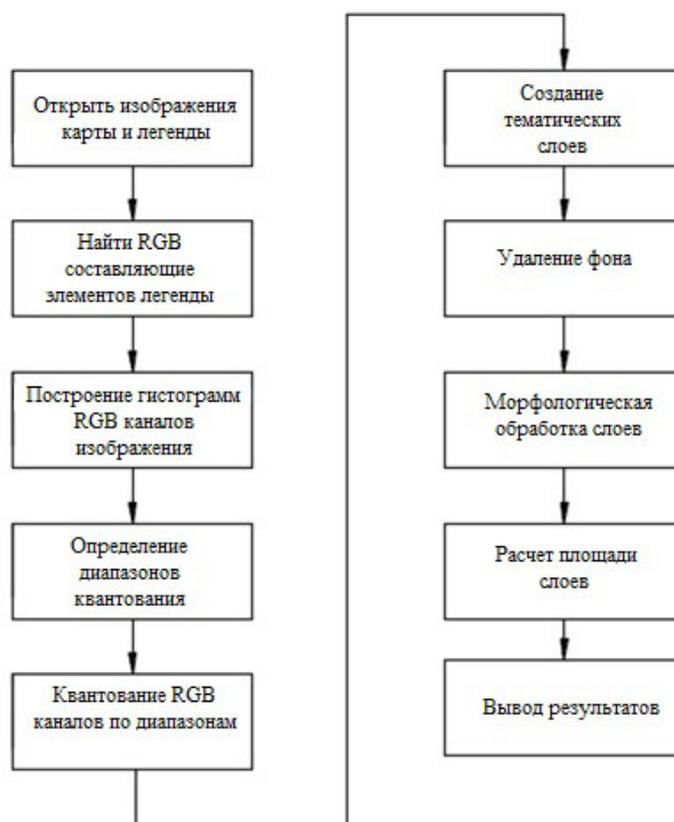


Рис. 1. Алгоритм работы программы

Fig. 1. Program operation algorithm

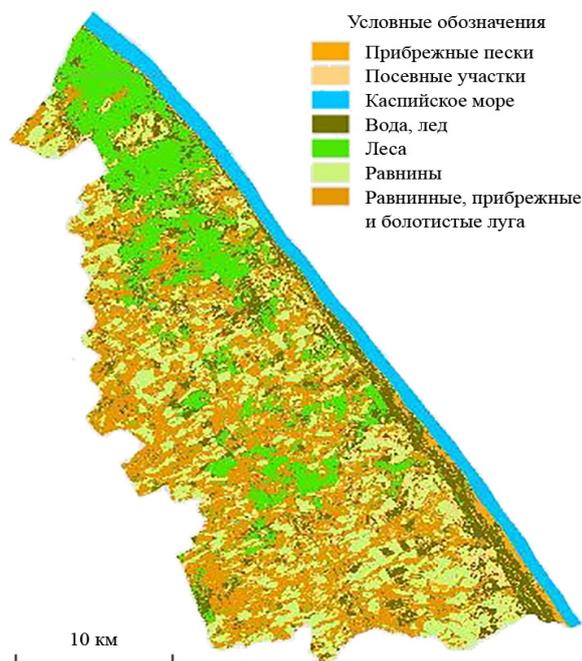
Работу программы поясним на примере обработки файла с изображением тематической карты Хачмазского р-на, созданной в 1987 г. (рис. 2).

Согласно легенде, на карте представлено 6 различных типов земельных участков, а также полоса моря. Кроме того, на изображении присутствовал фон, показывающий соседние с Хачмазским р-ном земли, т. е. всего 8 цветов, из которых нас интересовал цвет участков, занимаемых лесными массивами. Перед обработкой рисунок с изображением карты разделили на два, оставив в первом из них только ту часть, где показан Хачмазский р-н, а во втором – только ту, которая содержала легенду. Все остальное удалили. Такой прием позволил увеличить скорость обработки и одновременно уменьшить необходимый для работы программы объем памяти.

В первую очередь были определены RGB-составляющие всех цветов легенды. Цветное изображение формируется комбинацией трех цветовых состав-

Рис. 2. Тематическая карта
Хачмазского р-на 1987 г.

Fig. 2. Thematic map of the
Khachmaz region, 1987



ляющих, или каналов, – красного (R), зеленого (G) и синего (B). Таким образом, цвет каждого пикселя изображения можно передать набором из трех значений, каждое из которых изменяется от 0 до 255 и определяется автоматически с помощью функций набора инструментов Image Processing Toolbox в среде программы MATLAB. Каждому элементу легенды соответствует свой набор RGB. Например, в рассматриваемом изображении, согласно легенде, цвет лесных участков – (77, 230, 0), а цвет морских – (1, 197, 255).

Изученные нами карты довольно долго хранились в архивах. За это время некоторые части выцвели, сами карты «потерлись». Это привело к изменениям их исходного цвета. Чтобы определить степень искажений, для каждого цветового канала были отдельно построены гистограммы. Они в графическом виде показывают зависимость количества пикселей с одинаковым цветом на всем изображении от значения этого цвета. На рис. 3 приведены гистограммы трех каналов (R, G и B). На горизонтальной оси показана яркость пикселя, а на вертикальной оси – количество пикселей с одинаковой яркостью ($\times 10^5$).

Если взять современную электронную карту, созданную в ГИС, и построить гистограмму любого тематического слоя, то она будет состоять из определенного числа пиков различной высоты, которое не будет превышать число элементов легенды. В нашем же случае число основных цветов равно 8, в то время как гистограммы показывают наличие гораздо большего числа различных оттенков. Для коррекции изображения было решено в каждом канале создать некоторое число диапазонов, в которые бы вошли пиксели с близкими значениями интенсивности цвета. Число этих диапазонов и их границы определялись с помощью гистограмм.

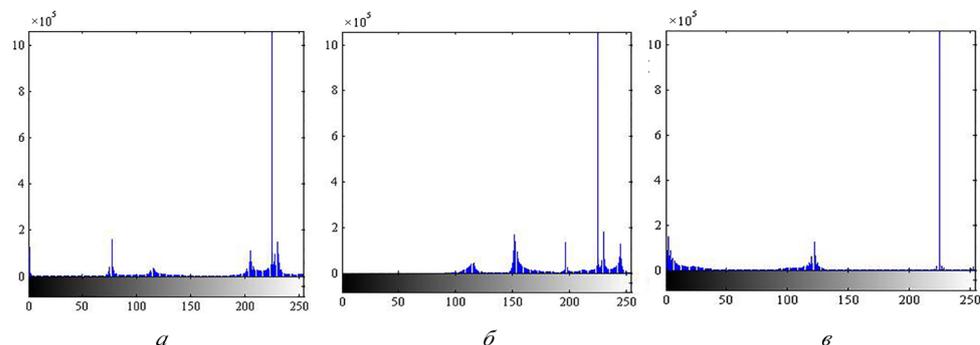


Рис. 3. Гистограммы изображения: *a* – канал R; *б* – канал G; *в* – канал B

Fig. 3. Image histograms: *a* – channel R; *б* – channel G; *в* – channel B

Так, в нашем случае гистограммы отдельных каналов имели соответственно 6, 7 и 3 пика. В соответствии с их числом программа разделила каждую гистограмму на такое же число диапазонов так, чтобы каждый пик оказался внутри отдельного промежутка. Вместе эти диапазоны охватывали значения интенсивностей цвета от 0 до 255. Затем каждому пикселю изображения были поставлены в соответствие номера диапазонов RGB каналов, в которые он попал. Другими словами, была проведена операция квантования каждого канала изображения по определенным с помощью гистограмм диапазонам, в результате чего каждому пикселю был присвоен набор из трех индексов. Аналогичные операции были проделаны со всеми элементами легенды карты, т. е. все цвета легенды также получили свои наборы из трех индексов. Например, в данном изображении пикселям слоя моря присвоили значение (1, 4, 3), а пикселям слоя лесных участков – (2, 6, 1). На основе этих наборов стало возможно отнести каждый из пикселей изображения к своему тематическому слою, включая и слой фона. На рис. 4, *a* приведено изображение полученного тематического слоя лесного массива Хачмазского р-на 1987 г., представляющее собой бинарное изображение.

Для удаления случайного шума полученные слои были морфологически обработаны и очищены от объектов величиной не более 2 пикселей. При этом изменение площади каждого из тематических слоев составило не более 3 %.

Расчет площади каждого из слоев проводился следующим образом. Сначала определялось общее количество пикселей изображения, из которого вычиталось число пикселей фона, а также число пикселей слоя моря. Так было найдено число пикселей изображения, соответствующего площади всего Хачмазского р-на. Затем для каждого из оставшихся слоев число пикселей этого слоя делили на число пикселей всего района и получали значения площадей, занимаемых различными участками, в процентах к площади самого района.

Аналогичной обработке подверглась тематическая карта района, созданная в 2011 г. Бинарное изображение слоя лесного массива за данный год приведено на рис. 4, *б*.

После этого вышеуказанные спутниковые изображения были введены в программу QGIS, свободно распространяемую ГИС с открытым кодом. Для классификации участков земной поверхности с разными типами покрытия был применен модуль Semi-Automatic Classification Plugin [3, 12], который для классификации использует анализ спектральных кривых. Спектральная кривая представляет собой матрицу полученных в разных спектральных каналах

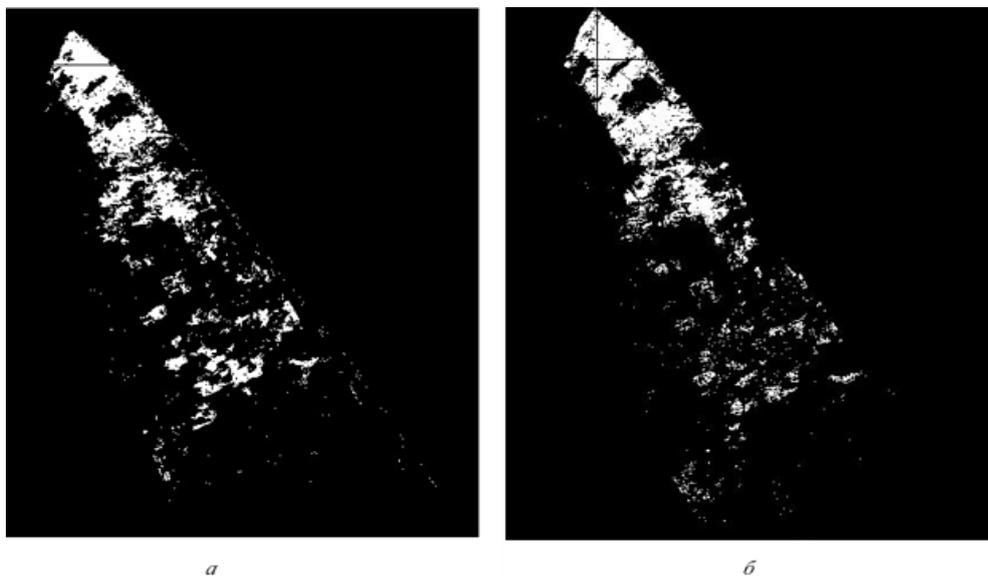


Рис. 4. Полученные тематические слои лесных массивов: *a* – 1987 г.; *б* – 2011 г.

Fig. 4. The resulting thematic layers of forests: *a* – 1987; *б* – 2011

коэффициентов отражения участков земной поверхности со схожими типами покрытия. Анализ спектральных кривых дает возможность классифицировать не только базовые типы (растительность, голая почва, вода, сооружения), но и с помощью тонкой настройки определять и другие типы [11, 16]. С использованием этого же модуля проведена предварительная обработка спутниковых данных, включая радиометрическую калибровку и атмосферную коррекцию [20].

Поскольку этих данных оказалось недостаточно для моделирования, их объединяли с данными космических съемок, полученными с помощью спутников Landsat-5 (1987 и 2000 г.) и Landsat-8 (2018 г.), а также производили усреднение данных.

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 1 приведены данные расчета площадей участков земной поверхности с разными типами покрытия для карт 1987 и 2011 гг.

Таблица 1

Результаты обработки тематических карт 1987 и 2011 гг.

Площадь тематического слоя, км ²	1987 г.	2011 г.
Лесной массив	156,9	180,7
Сельскохозяйственные угодья	82,3	233,0
Пески	123,3	124,6

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что увеличились площади, занимаемые лесами и сельскохозяйственными угодьями, размер площади других участков изменился незначительно. Погрешность вычисления складывалась из погрешностей сканирования, классификатора и морфологической обработки [13] и составила около 15 %.

Для определения динамики изменения площади лесного покрова были добавлены данные дистанционного зондирования спутников Landsat-5 и Landsat-8. В анализе использовались спутниковые снимки от 29 августа 1987 г., 31 июля 2000 г. и 1 июля 2018 г., полученные с помощью сайта организации United States Geo Survey [22].

Все данные, архивные и спутниковые, помещены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные для изучения динамики лесного покрова

Год	Площадь лесов, км ²		
	Архив	Landsat-5/-8	Сводные данные
1987	156,9	–	156,9
1987	–	185,6	185,6
2000	–	182,0	182,0
2011	180,7	–	180,7
2018	–	142,5	142,5

При этом проявляется тенденция к сокращению общей площади лесного покрова.

На рис. 5 приведена динамика площади лесного покрова Хачмазского р-на, где сплошной линией показан график, построенный по данным табл. 2 (за 1987 г. взято среднее значение), штрих-пунктирной – значения модели, пунктирной – тренд. Модель создана с помощью программы, разработанной в среде MATLAB [9].

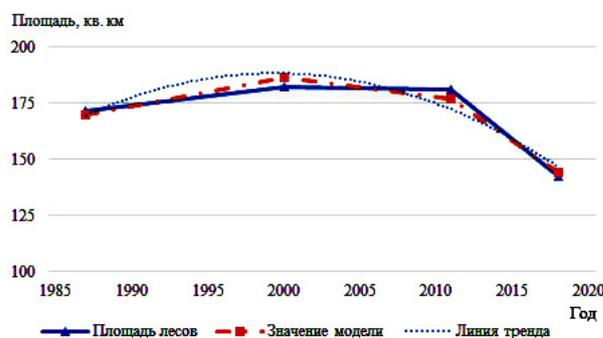


Рис. 5. Изменение площади лесного покрова Хачмазского р-на

Fig. 5. Changes in the area of the Khachmaz region forest cover

Программа для расчета модели использует метод группового учета аргументов [14]. Модель рассчитывается за несколько итераций. С каждой итерацией точность модели повышается. В рассматриваемом случае погрешность моделирования составила менее 1 %.

Тренд рассчитан с помощью программы Excel. Полиномиальный тренд позволяет делать кратко- или среднесрочные прогнозы, имеет тенденцию к цикличности. Цикличность движения свойств лесных организмов не только по отдельности, но и их экосистем в целом подтверждается исследователями [2, 10] и др. При этом жизненные циклы организмов не фиксированы жестко, а пластичны и зависят от взаимодействия организмов со средой их обитания [8]. Только за 7 лет (2011–2018гг.) уменьшение площади лесов составило 21 %.

Выводы

1. Используемые для моделирования состояния лесного покрова данные спутниковых изображений, а также архивных тематических карт позволили выявить определенную цикличность в изменении площади лесного массива и общую тенденцию к ее сокращению.

2. Для обработки архивных карт был разработан алгоритм, который позволяет быстро и эффективно провести разбивку любых тематических карт, представленных изображениями (в том числе зашумленными и неидеальными), на отдельные тематические слои с точки зрения соответствия цветам легенды. Увеличение разрешения сканирования и правильный подбор параметров морфологической обработки повышают точность метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ализаде Э.К., Гулиева Ф.Э. Метод оценки воздействия антропогенного фактора на лесной покров в горных зонах // Вестн. Алтайск. гос. аграр. ун-та. 2016. № 3(137). С. 84–90. [Alizade E.K., Guliyeva F.E. The Method to Evaluate the Anthropogenic Factor Impact on Forest Cover in Mountainous Areas. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agrarian University], 2016, no. 3(137), pp. 84–90].

2. Бегон М., Харпер Дж., Таунсенд К. Экология. Особи, популяции и сообщества. Т. 2. М.: Мир, 1989. 477 с. [Begon M., Harper J.L., Townsend C.R. *Ecology: From Individuals to Ecosystems*. Vol. 2. Moscow, Mir Publ., 1989. 477 p.].

3. Инструментарий QGIS для полуавтоматической классификации земель сельскохозяйственного возделывания по данным КА Sentinel. Режим доступа: <https://www.tvis.com.ua/ru/news/semi-automatic-classification-plugin> (дата обращения 19.06.2020). [QGIS Toolkit for Semi-Automatic Classification of Agricultural Land according to Sentinel Spacecraft Data].

4. Луганский Н.А., Залесов С.В., Луганский В.Н. Лесоведение. Екатеринбург: УГЛТУ. 2010. 432 с. [Luganskiy N.A., Zalesov S.V., Luganskiy V.N. *Forest Science*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2010. 432 p.].

5. Лукина Н.В., Исаев А.С., Крышень А.М., Онучин А.А., Сирин А.А., Гагарин Ю.Н., Барталев С.А. Приоритетные направления развития лесной науки как основы устойчивого управления лесами // Лесоведение. 2015. № 4. С. 243–254. [Lukina N.V., Isaev A.S., Kryshen' A.M., Onuchin A.A., Sirin A.A., Gagarin Yu.N., Bartalev S.A. Research Priorities in Forest Science – the Basis of Sustainable Forest Management. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2015, no. 4, pp. 243–254].

6. Мусейбов М.А. Ландшафты Азербайджанской Республики. Баку: БГУ. 2003. 151 с. [Museibov M.A. *Landscapes of the Republic of Azerbaijan*. Baku, BSU Publ., 2003. 151 p.].

7. Прилипко Л.И. Растительный покров Азербайджана. Баку: Элм, 1970. 168 с. [Prilipko L.I. *Vegetation Cover of Azerbaijan*. Baku, Elm Publ., 1970. 168 p.].

8. Проскуряков М.А. Проблема хронобиологической цикличности движения свойств лесных экосистем // Сиб. лесн. журн. 2015. № 2. С. 71–84. [Proskuryakov M.A. Problem of Chronobiological Cyclic of Movement of Forest Ecosystems Properties. First Communication. *Sibirskij Lesnoj Zurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2015, no. 2, pp. 71–84]. DOI: [10.15372/SJFS20150206](https://doi.org/10.15372/SJFS20150206)

9. Сулейманов Т.И., Мустафазаде Н.Х., Гулузаде Р.К. Обработка данных мониторинга атмосферных загрязнений города Баку // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. № 10. С. 41–45. [Suleymanov T.I., Mustafazade N.Kh., Guluzade R.K. The Data Processing of Air Pollution Monitoring in Baku City. *Pribory i sistemy*.

Upravleniye, kontrol', diagnostika [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 2016, no. 10, pp. 41–45].

10. Чистик О.В., Головатый С.Е., Позняк С.С. Общая и радиационная экология // Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2012. 313 с. [Chistik O.V., Golovatyy S.E., Poznyak S.S. *General and Radiation Ecology*. Minsk, ISEI BSU Publ., 2012. 313 p.].

11. Campbell J., Wynne R.H. *Introduction to Remote Sensing*. New York, Guilford Press, 2011. 667 p.

12. Congedo L. *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation*. Release 6.4.0.2. 2020. 239 p. Available at: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5302121/mod_resource/content/1/SCP_manual.pdf (accessed 14.02.20).

13. Gomasasca M.A. *Basics of Geomatics*. Dordrecht, Springer, 2009. 656 p. DOI: [10.1007/978-1-4020-9014-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9014-1)

14. *Group Method of Data Handling*. Available at: <https://www.gmdh.net> (accessed 09.06.16).

15. *Image Processing Toolbox Documentation – MathWorks*. Available at: <https://www.mathworks.com/help/images> (accessed 08.12.19).

16. Jensen J.R. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. New Jersey, Prentice Hall, 2004. 526 p.

17. Knoke T. Shades of Forest Change. *Book of Abstracts of an International Conference of IUFRO Unit 4.02.00 on Forest Cover Change, Freising, Germany, April 2–4, 2014*. Freising, IUFRO, 2014, p. 3.

18. Manfreda S., McCabe M., Miller P., Lucas R., Madrigal V.P., Mallinis G. et al. On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, iss. 4, art. 641. DOI: [10.3390/rs10040641](https://doi.org/10.3390/rs10040641)

19. Pahari K., Murai Sh. Modeling for Prediction of Global Deforestation Based on the Growth of Human Population. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, vol. 54, iss. 5-6, pp. 317–324.

20. *Radiometric Calibration*. L3 Harris Geospatial Documentation Center. Available at: <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/RadiometricCalibration.html> (accessed 17.12.19).

21. *The Forests of the Republic*. Ministry of Ecology and Natural Resources of Azerbaijan Republic. Available at: <http://eco.gov.az/az/fealiyyet-istiqametleri/mesheler> (accessed 25.10.19).

22. *United States Geological Survey*. Available at: <https://www.usgs.gov> (accessed 30.08.19).

ALGORITHM AND MEASUREMENT OF FOREST COVER AREA CHANGE IN THE KHACHMAZ REGION OF AZERBAIJAN BY SATELLITE MONITORING

Valida M. Mamedaliyeva, Candidate of Geography; ResearcherID: [AAC-5454-2021](https://orcid.org/0000-0002-8775-8564),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8775-8564>

Institute of Ecology, Azerbaijan National Aerospace Agency, ul. S.S. Akhundova, 1, Baku, Republic of Azerbaijan; e-mail: valide.mamedaliyeva@mail.ru

Abstract. The article presents the results of long-term observations of the forest cover state in the Khachmaz region of Azerbaijan. Both the results of Earth's remote sensing and the data of earlier observations carried out by field monitoring were used in the study. The earlier data was stored in the form of thematic maps on paper. The results of remote sensing contained multispectral satellite images obtained over several years. Image processing was performed using the QGIS program and the Semi-Automatic Classification Plugin. The processing included radiometric and atmospheric correction, as well as classification of the study area by the type of land surface coverage. Classification was performed on the

basis of the spectral curves analysis in various sections of the region. The areas occupied by forests were determined based on the classification. The set of observations included data from the available archival materials – thematic maps of the Khachmaz region. A software in MATLAB was developed for processing the maps and calculating the area of forests. The program operation algorithm includes histogram analysis of the image as a whole and separately of the legend. The histogram of the legend determines the number of thematic layers of the map. They do not include layers containing unused colors, such as the colors of neighboring areas, sections of the sea, etc. Then color correction of image pixels is performed, namely, quantization of colors according to the number of specific thematic layers. Later on, morphological processing of each layer is carried out. Areas containing less than the specified number of pixels are assigned the color of the surrounding layer. The number of pixels of each layer and all layers are calculated. Finally, the obtained ratios are used to calculate the area of each layer. The data of processing of archival materials together with the results of remote sensing are summarized in a joint table. According to the table, a diagram of changes in the forest area is constructed, as well as a model in the form of a polynomial showing this dynamics. The diagram analysis revealed a tendency to a decrease in the area of forests. The forest area has decreased by 21 % for 7 years. The developed algorithm splits thematic maps into separate layers in accordance with the colors of the legend.

For citation: Mamedaliyeva V.M. Algorithm and Measurement of Forest Cover Area Change in the Khachmaz Region of Azerbaijan by Satellite Monitoring. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 106–115. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-106-115

Keywords: forest cover, area, dynamics of changes, Khachmaz region, electronic maps, thematic layer, image processing.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

The author declare that there is no conflict of interest

Поступила 28.03.20 / Received on March 28, 2020
