

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ЗЕМЕЛЬ В ПЕРЕХОДНОЙ ПРИРОДНО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ЗОНЕ ВОЛГОГРАДСКОГО ЗАВОЛЖЬЯ

© 2023 г. В. А. Силова*

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение “Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук”, Волгоград, Россия

*E-mail: viktoriatem@mail.ru

Поступила в редакцию 22.07.2022 г.

Северная часть Волгоградского Заволжья расположена в переходной зоне от Малого Сырта к Прикаспийской низменности. Для этой зоны характерно изменение климатических условий в сторону уменьшения количества выпадающих осадков и почвенных условий, выражающихся в переходе от степных к полупустынным типам почв. Такое состояние земель обусловлено особенностями физико-географических условий переходной зоны и влиянием хозяйственной деятельности. В результате мониторинга появляется возможность отслеживать процессы их деградации, приводящие к падению плодородия почв. Использование результатов мониторинга позволит планировать проведение мероприятий по нейтрализации последствий их деградации. Основные результаты исследований деградированных земель в районе Волгоградского Заволжья получены на основе спутниковых изображений Landsat 7, 8 за двадцатилетний период. На основе изучения динамики изменения площадей подверженных деградации проведено геоинформационное картографирование деградированных земель в период с 1984 по 2020 гг. Оценка деградации проводится с использованием инструментов геоинформационного анализа и данных дистанционного зондирования земли на территории исследований. При этом были выявлены изменения площади очагов деградации с проективным покрытием менее 10%, установлено их пространственное распределение, установлено изменение такой площади за период исследований. Роль космоснимков в системе мониторинга заключается в своевременном установлении изменений состояния изучаемой территории, в том числе растительности (проективного покрытия), определения их площади и пространственного расположения, а также уточнения геометрических характеристик объектов исследований, которые можно выявить на отображаемом растре. Анализ состояния земель осуществляется по проективному покрытию растительности, которое с большой вероятностью устанавливается по тону изображения, как основной характеристике растра космических снимков и идентифицируется на отдельные изучаемые объекты. В настоящее время в связи с засушливостью климата на территории Волгоградского Заволжья, низким естественным плодородием почв, ненормированной хозяйственной нагрузкой продолжается процесс деградации земель (Ткаченко, Кошелев, 2019). Очаги деградации с проективным покрытием менее 10% составляют в среднем свыше 150 тыс. га. Рост площади таких участков деградации установлен в 1984, 1995, 1999, 2004, 2007, 2018, 2020 гг. Площадь участков деградации на территории исследования в отдельные годы превышала 300 тыс. га, что на 100% выше чем среднее за все время исследований. В связи с этим мониторинг Волгоградского Заволжья имеет большое значение для своевременного выявления процессов деградации земель в аридных условиях и разработки мер по их реабилитации.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, спутниковый мониторинг, опустынивание, деградация, Заволжье

DOI: 10.31857/S0205961423020045, **EDN:** ТСХОУИ

ВВЕДЕНИЕ

Исследования состояния земель в переходных природно-географических зонах показывают, что в настоящее время площади деградированных участков растут. На территории Волгоградского Заволжья отмечается тенденция роста площадей деградированных земель, что объясняет актуальность исследования. Единая направленность расширения деградированных, а также безлюдных территорий прослеживается в южных ареалах

Волгоградского Заволжья (Рулев, 2012; Ткаченко, 2014).

В связи с этим основной задачей работы является мониторинг изменения площадей участков подверженных деградации в переходной природно-географической зоне Волгоградского Заволжья.

Наиболее эффективным методом изучения состояния земель является аэрокосмический мониторинг, позволяющий за короткое время провести исследования на больших территориях и существенно снизить экономические затраты (Guo,

et al., 2017). Аэрокосмический мониторинг проведен с использованием спутниковых данных за двадцатилетний период. Использование геоинформационных технологий дает возможность провести картографическую оценку пространственного положения и площадей деградированных земель (Виноградов, 1984).

Деградация земель на территории Волгоградского Заволжья обусловлена климатическими и почвенными условиями, а также нерегламентированной хозяйственной нагрузкой. В связи с тем, что территория исследований расположена в переходной зоне от Малого Сырта к Прикаспийской низменности здесь отмечается существенное изменение почвенных условий каштановых почв (от темно-каштановых в северной части до светло-каштановых в южной), широко распространены солонцы, особенно в бессточной части. В связи с этим опустынивание обусловлено такими видами деградации как: водной эрозией в северной части территории исследования, засолением на всей территории и дефляцией на равнинных участках. Сумма среднегодовых осадков за последнее двадцатилетие составляет 286 мм при испаряемости до 1000 мм в год. Среднегодовая температура воздуха составляет 7°C, перепад между максимальной и минимальной температурой составляет порядка 80°C (Сажин, Кулик, Васильев, 2010). В переходной природно-географической зоне развитие процессов деградации, таких как засоление, дефляция и эрозия усугубляют сложные условия для развития хозяйственной деятельности (Рулев, Канишев, Шинкаренко, 2016).

В результате исследования установлена цикличность изменения площадей деградированных земель и зависимость площади деградации от количества выпадающих осадков, являющимся доминирующим фактором в переходной природно-географической зоне “степь–полупустыня” Волгоградского Заволжья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Мониторинг состояния земель в переходной природно-географической зоне был проведен по методике использования результатов дешифрирования данных дистанционного зондирования территории Волгоградской Заволжья и геоинформационного картографирования подстилающих поверхностей на основе программного комплекса QGIS. В работе использованы космоснимки спутников Landsat 7 (до мая 2003 г.) и Landsat 8 полученных с сервиса <https://earthexplorer.usgs.gov>. Снимки для анализа выбирались с периода 2003 по 2013 гг. без пропущенных полос в весенне–летний период.

Состояние земель Волгоградской Заволжья определяется по космоснимкам на основании установления значений проективного покрытия растительности исследуемой территории, так как проективное покрытие с высокой точностью

(ошибка менее 20%) определяется по данным дистанционного зондирования земли (Виноградов, 1993). Для выявления пространственного распределения контуров растительности проводится геоинформационный анализ пространственного распределения проективного покрытия и составляются соответствующие картографические слои (Кулик, Рулев, Юферов, 2013, 2015).

На основании анализа пространственного распределения проективного покрытия осуществляется векторизация полученных данных и создаются векторные контуры, а в соответствии с методическими рекомендациями по выявлению деградированных и загрязненных земель, где определены для зоны полупустыни соответствующие степени деградации земель (Kulik, Petrov, Yuferev, Tkachenko, Shinkarenko, 2020).

В нашей работе рассмотрена крайняя степень деградации земель (бедствие) (Виноградов, 1993), для выявления очагов возможного опустынивания территории (Zonn, Kust, Andreeva, 2017).

Для классификации опустынивания по изображению на космоснимках выбрано значение проективного покрытия 0–10% от зонального. Классификация растрового изображения проводилась в программном комплексе QGIS. Для охвата всей территории исследования были использованы отдельные каналы спектрзональной съемки № 2 (B), № 3 (G), № 4 (R), № 8 (Panchrom), на основе которой созданы цветосинтезированные снимки с разрешением 15м. Для анализа использовались спектрзональные снимки территории Волгоградского Заволжья с пространственным разрешением 30 м и точностью позиционирования 12 м (Кузнецов, Пошехонов, Рыжикив, 2015).

Объединение полученных снимков позволило разработать космокарту на территорию исследования.

Исследования деградации и опустынивания в переходных природно-географических зонах проводились Б.В. Виноградовым, К.Н. Куликом, В.И. Петровым и В.Г. Юферовым и др. В их работах были определены причины негативных явлений, связанных с опустыниванием.

Особенностью переходных природно-географических зон является периодическое изменение климатических условий, характерных как для степной, так и для полупустынной зоны и соответствующей реакции растительного покрова на это изменение (Kulik, Petrov, Rulev, Kosheleva, Shinkarenko, 2018). Разработки, связанные с изучением деградации и опустынивания, определили подходы к выявлению негативных явлений и установления масштабов и пространственного распределения их степени (Lyu, et al., 2020).

Для верификации данных дистанционного зондирования земли были разработаны фотоэталон деградации земель. На фотоэталонах были

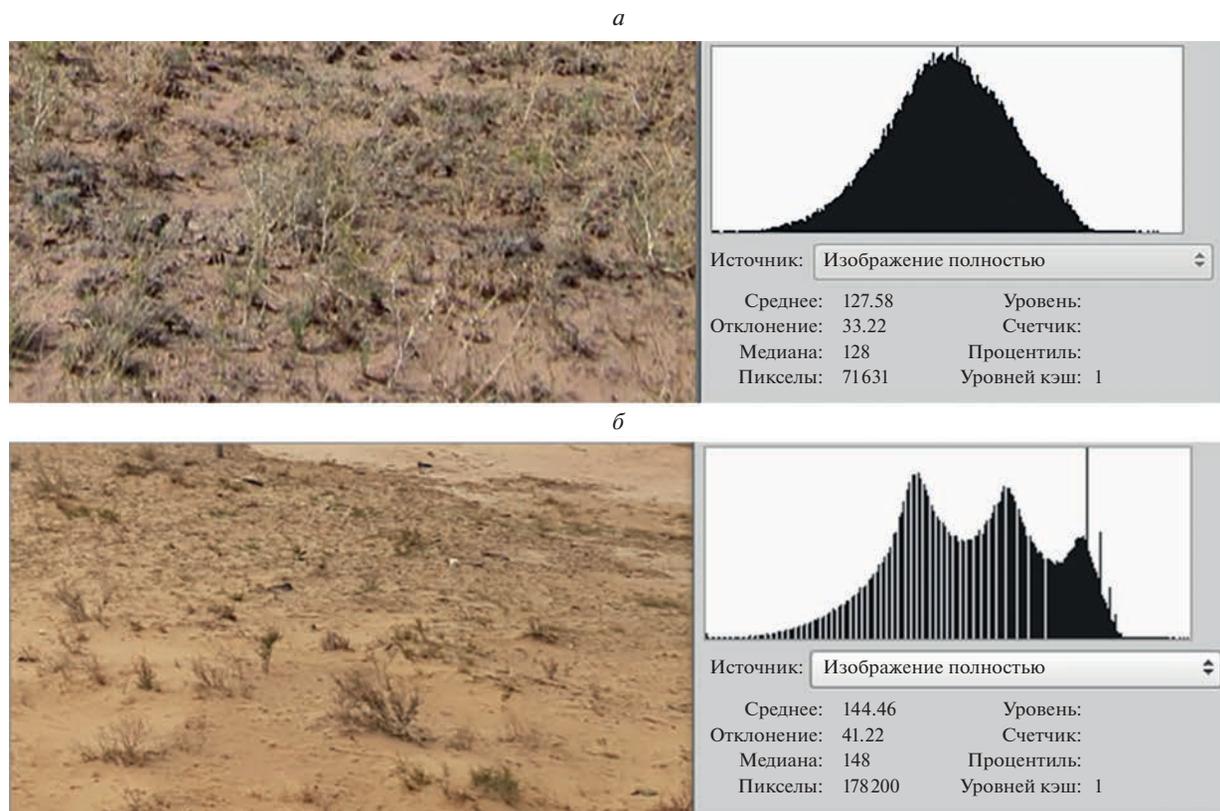


Рис. 1. Фотоэталон с проективным покрытием: а – 25%, б – 10%.

получены средние значения тона изображения и вычислено стандартное отклонение, путем анализа пикселей раstra подстилающей поверхности выделены участки, подверженных деградационным процессам. Фотоэталонирование позволяет получить данные по доли очагов опустынивания в исследуемом регионе.

Методика дешифрирования заключается в полуавтоматической классификации изображения космоснимка основанная на выделении тона изображения растительности с различным проективным покрытием. В нашем случае для установления степени деградации использовался диапазон тона пикселей, соответствующий проективному покрытию менее 10%.

Для проведения мониторинга состояния земель (Юферев, 2007) был применен метод пространственно-временного анализа космокарт, разработанных на период с 2000 по 2020 гг. на которых выделялись контуры, соответствующие степени деградации бедствия.

Оценка динамики площади деградации земель на территории исследования проводилась с использованием регрессионного анализа с разработкой уравнения регрессии и определением коэффициентов аппроксимации и определением корреляционной связи расчетных и фактических данных (Кузьмина, Трешкин, 2014).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Мониторинг состояния земель в переходной природно-географической зоне Волгоградского Заволжья проведен на основе данных дистанционного зондирования спутников Landsat 7, 8 в период 1984–2020 гг.

Фотоэталонирование тестовых участков позволило выявить значения фототона изображения для характерных участков деградированных земель.

Для проведения исследований были отобраны репрезентативные тестовые участки территории Волгоградского Заволжья, на которые были получены спектрзональные снимки и разработаны космокарты территории Заволжья. В результате классификации снимков по проективному покрытию были получены контуры участков, со степенью деградации “бедствие” и разработаны космокарты деградации по годам исследования (рис. 2).

В табл. 1 приведены значения площадей деградированных земель (степень деградации “бедствие”) и количество осадков по годам исследования.

На рис. 3 данные за весь период исследований, вместе с моделью – уравнением связи площади опустынивания с временем от начала исследований.

Корреляционный анализ данных проведен по годам исследований начиная с 1984 года (первый год исследования) по 2020 год в течение 37 лет по-

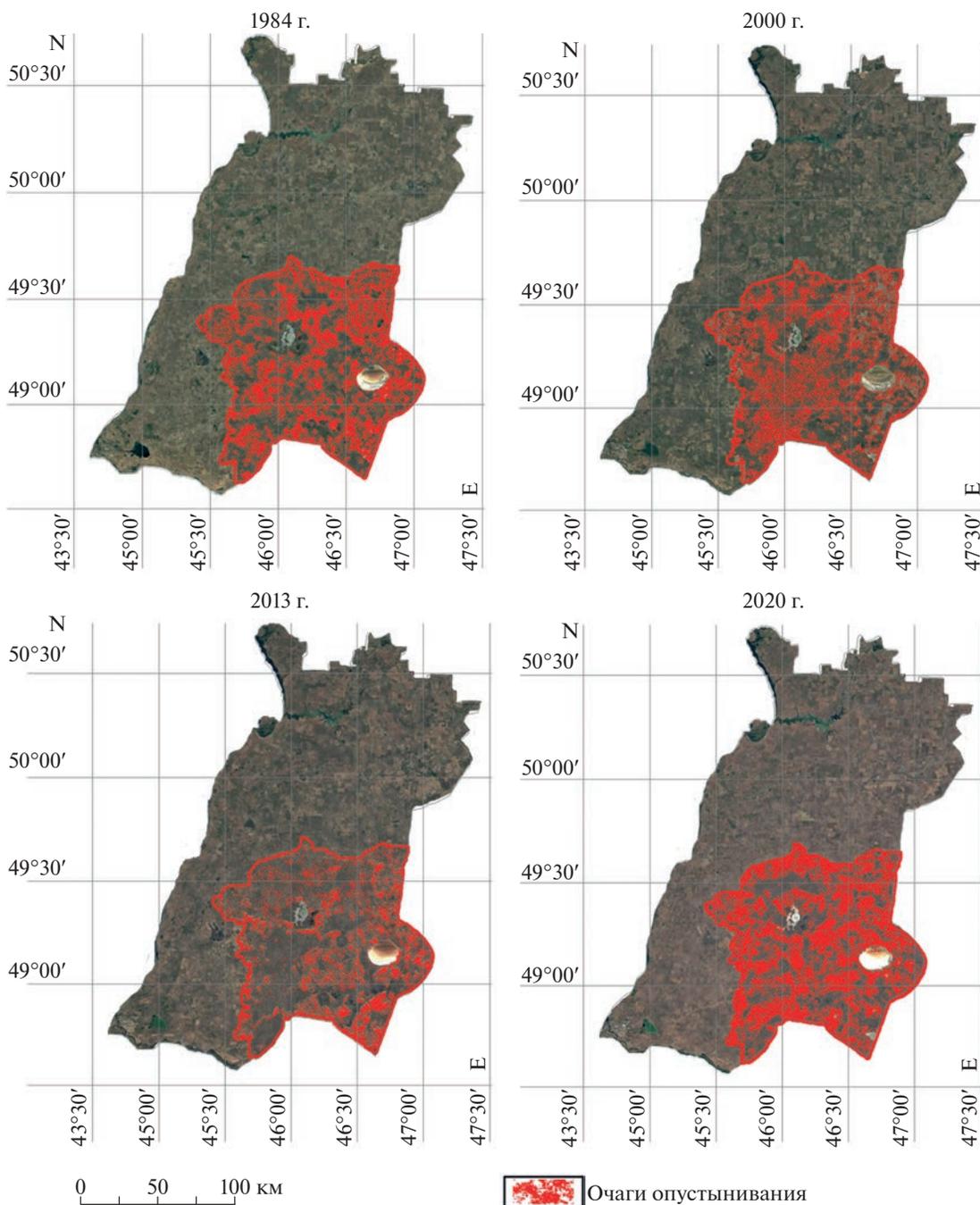


Рис. 2. Космокарты деградации земель Волгоградского Заволжья по годам исследований.

казал отрицательную связь между суммарным количеством осадков и площадью опустынивания (рис. 3).

В связи с тем, что площадь очагов опустынивания изменяется во времени, то можно на основании многолетних изменений такой площади разработать модель ее изменений на основании ретроспективного анализа.

Закономерность изменения площадей очагов подверженных опустыниванию ($S_{оп}$), по времени

от начала исследований ($t = 1-37$) можно описать уравнением регрессии.

$$S_{оп} = -50 \times \text{SIN}(-2.41t + 0.0256) + 281.$$

Коэффициент корреляции значения модели площади опустынивания по данным 1984 г. с фактическим изменением площадей опустынивания $R = 0.53$.

Проведенный мониторинг территории Заволжья Волгоградской области за 37 лет с использованием данных дистанционного зондирования

Таблица 1. Площади деградированных земель и количество осадков по годам исследований

Номер года исследований	Год исследований	Осадки, мм	Площадь опустынивания, тыс. га	Номер года исследований	Год исследований	Осадки, мм	Площадь опустынивания, тыс. га
1	1984	198.8	338.12	20	2003	322.2	235.30
2	1985	374.4	294.84	21	2004	342.6	338.94
3	1986	271.4	319.11	22	2005	266	249.24
4	1987	394	282.30	23	2006	223.2	314.30
5	1988	418	309.59	24	2007	257.7	338.98
6	1989	495.2	439.68	25	2008	275.5	286.24
7	1990	477.4	200.19	26	2009	292.5	263.93
8	1991	317.5	318.64	27	2010	275.4	308.13
9	1992	374.5	204.96	28	2011	269.2	250.93
10	1993	458.9	200.68	29	2012	290.3	216.06
11	1994	279.8	369.01	30	2013	412.5	161.97
12	1995	342.3	378.15	31	2014	244.6	160.68
13	1996	241.8	263.54	32	2015	222.9	251.66
14	1997	402.5	329.86	33	2016	327.0	238.75
15	1998	227.5	229.40	34	2017	250.0	268.10
16	1999	285.1	324.79	35	2018	254.0	339.50
17	2000	371.9	297.51	36	2019	274.0	194.56
18	2001	329.6	175.74	37	2020	182.0	442.73
19	2002	332.9	278.71				

по материалам спутниковых снимков позволил определить изменение площади очагов опустынивания и сумм атмосферных осадков за период с 1984 по 2020 гг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате космического мониторинга изменения площадей опустынивания на территории

Волгоградского Заволжья было установлено, что площадь опустынивания в основном зависит от количества выпадающих осадков. Установлено, что в связи с цикличностью выпадения осадков наблюдается цикличность изменения площади опустынивания. Определена тенденция к снижению количества выпадающих осадков за исследуемый период (на 80 мм). Данные дистанционного зондирования земли дают возможность выявить

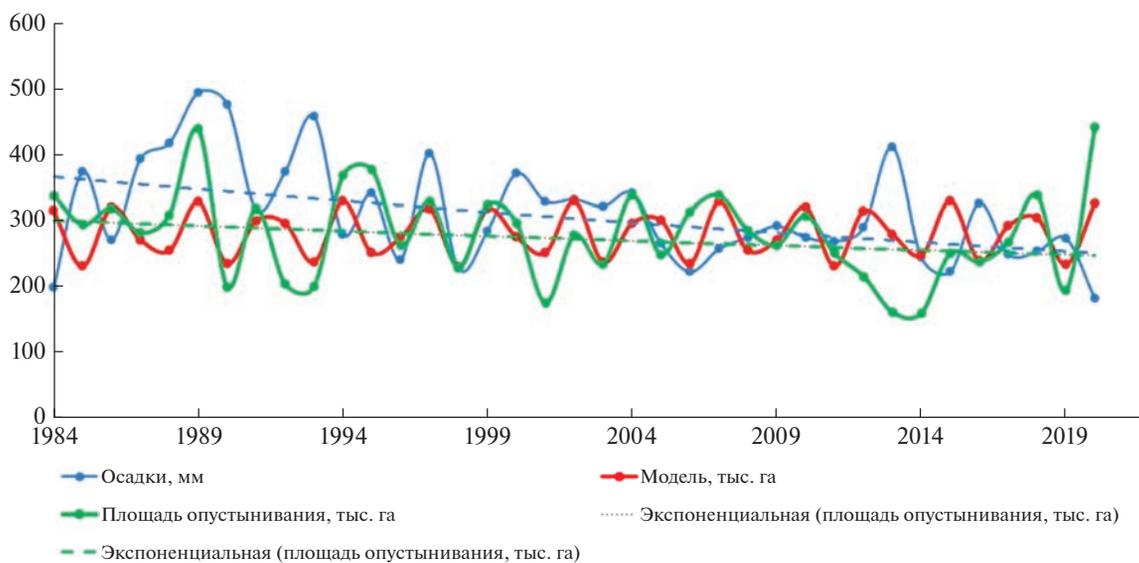


Рис 3. Площади деградированных земель и количество годовых осадков по годам исследования.

участки опустынивания, выделить их контуры и определить площади. За последние годы просматривается тенденция к стабилизации площади опустынивания, не смотря на снижение количества выпавших осадков. Однако в 2020 г. отмечено резкое увеличение площади, обусловленное засухой. Циклическая функция, представленная в работе уравнением дает возможность прогнозировать с определенной достоверностью вероятные изменения площади опустынивания в последующие годы.

Таким образом для сохранения и восстановления экосистем в условиях аридного климата на территории Заволжья Волгоградской области необходимо проведение фитомелиоративных мероприятий по реабилитации деградированных земель, для повышения продуктивности естественных пастбищ.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Госзадания ФНЦ агроэкологии РАН госрегистрация № 1220200000100311-3 по теме FNFT-2022-0003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградов Б.В.* Аэрокосмический мониторинг экосистем. М.: Наука, 1984. 320 с.
- Виноградов Б.В.* Дистанционные индикаторы опустынивания и деградации почв. Почвоведение. 1993. № 2. С. 98–103.
- Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И., Рыжиков А.С.* Технология автоматического контроля точности геопривязки спутниковых изображений по опорным снимкам от ка "Landsat-8" // Цифровая обработка сигналов. 2015. № 3. С. 37–42.
- Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е.* Климатические изменения в бассейне Нижней Волги и их влияние на состояние экосистем // Аридные экосистемы. 2014. Т. 20. № 3(60). С. 14–32.
- Кулик К.Н., Рулев А.С., Юфев В.Г.* Геоинформационный анализ очагов опустынивания на территории Астраханской области // Аридные экосистемы. 2013. Т. 19. № 4. С. 91–98.
- Кулик К.Н., Рулев А.С., Юфев В.Г.* Геоинформационный анализ динамики опустынивания на территории Астраханской области // Аридные экосистемы. 2015. Т. 21. № 3. С. 23–32.
- Рулев А.С.* Компьютерное картографирование пространственного распределения градиентов показателей регионального климата юго-востока Европейской части России // Вестник ВолГУ. География и геоинформатика. Серия 11. 2012. № 1(3). С. 72–77.
- Рулев А.С., Канищев С.Н., Шинкаренко С.С.* Анализ сезонной динамики NDVI естественной растительности Заволжья Волгоградской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 113–123.
- Сажин А.Н., Кулик К.Н., Васильев Ю.И.* Погода и климат Волгоградской области. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2010. 306 с.
- Ткаченко Н.А.* Качественная оценка и картографирование деградации пахотных земель Волгоградского Заволжья // Изв. Оренбургского государственного аграрного университета. 2014. № 2(46). С. 21–23.
- Ткаченко Н.А., Кошелев А.В.* Подверженность процессам деградации сельскохозяйственных угодий Волгоградского Заволжья // Научно-агрономический журн. 2019. № 2(105). С. 7–9.
- Юфев В.Г.* Дистанционный мониторинг состояния и динамики агроландшафтов // Земледелие. 2007. № 3. С. 8–9.
- Guo Q., Fu B., Shi P., Cudahy T., Zhang J., Xu H.* Satellite Monitoring the Spatial-Temporal Dynamics of Desertification in Response to Climate Change and Human Activities across the Ordos Plateau, China // Remote sensing. 2017. V. 9. № 6. P. 255.
- Kulik K.N., Petrov V.I., Rulev A.S., Kosheleva O.Y., Shinkarenko S.S.* K 30-letiyu General'nogo plana po bor'be s opustynivaniem chernozemov i Kizlyarskih pastbishch [On the 30th anniversary of the "General plan to combat desertification of Black lands and Kizlyar pastures"] // Arid ecosystems. 2018. V. 8(1). P. 5–20. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S2079096118010067>
- Kulik K.N., Petrov V.I., Yufev V.G., Tkachenko N.A., Shinkarenko S.S.* Geoinformacionnyy analiz opustynivaniya Severo-Zapadnogo Kaspiya [Geoinformational Analysis of Desertification of the Northwestern Caspian] // Arid Ecosystems. 2020. V. 10. № 2. P. 98–105. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S2079096120020080>
- Lyu Y., Shi P., Han G., Liu L., Guo L., Hu X., Zhang G.* Desertification Control Practices in China // Sustainability. 2020. 12: 3258. <https://doi.org/10.3390/su12083258>
- Zonn I.S., Kust G.S., Andreeva O.V.* Paradigma opustynivaniya: 40 let razvitiya i global'nye usiliya [Desertification paradigm: 40 years of development and global efforts] // Arid ecosystems. 2017. V. 7. № 3. P. 131–141. (In Russian).

Satellite Monitoring of Desertification in the Transitional Natural-Geographical Zone of the Volgograd Region

V. A. Silova

Federal State Budget Scientific Institution "Federal Scientific Centre of agroecology, complex melioration and protective afforestation of the Russian Academy of Sciences", Volgograd, Russia

The northern part of the Volgograd Volga region is located in the transition zone from the Small Syrt to the Caspian lowland. This zone is characterized by a change in climatic conditions towards a decrease in the amount of precipitation and soil conditions, expressed in the transition from steppe to semi-desert soil types. This condition of the lands is due to the peculiarities of the physical and geographical conditions of the transition zone and the influence of economic activity. As a result of monitoring, it becomes possible to monitor the processes of their degradation, leading to a drop in soil fertility. The use of monitoring results will make it possible to plan measures to neutralize the consequences of their degradation. The main results of studies of degraded lands in the Volgograd Volga region

were obtained on the basis of satellite images of Landsat 7, 8 over a twenty-year period. Based on the study of the dynamics of changes in areas subject to degradation, geoinformation mapping of degraded lands was carried out in the period from 1984 to 2020. Degradation assessment is carried out using geoinformation analysis tools and Earth remote sensing data in the research area. At the same time, changes in the area of degradation foci with a projective coverage of less than 10% were revealed, their spatial distribution was established, and the change in such an area over the period of research was established. The role of satellite images in the monitoring system is to timely establish changes in the state of the studied territory, including vegetation (projective cover), determine their area and spatial location, as well as clarify the geometric characteristics of research objects that can be identified on the displayed raster. The analysis of the state of the lands is carried out by the projective vegetation cover, which is most likely established by the tone of the image as the main characteristic of the satellite images raster and is identified into individual objects under study. Currently, due to the aridity of the climate on the territory of the Volgograd Volga region, low natural soil fertility, abnormal economic load, the process of land degradation continues (Tkachenko, Koshelev, 2019). Degradation foci with a projective coverage of less than 10% average over 150 thousand hectares. The growth of the area of such degradation sites is established in 1984, 1995, 1999, 2004, 2007, 2018, 2020 years. The area of degradation sites in the study area in some years exceeded 300 thousand hectares, which is 100% higher than the average for the entire time of research. In this regard, monitoring of the Volgograd Volga region is of great importance for the timely detection of land degradation processes in arid conditions and the development of measures for their rehabilitation.

Keywords: remote sensing, satellite monitoring, desertification, degradation, Trans-Volga region

REFERENCES

- Guo Q., Fu B., Shi P., Cudahy T., Zhang J., Xu H. Satellite Monitoring the Spatial-Temporal Dynamics of Desertification in Response to Climate Change and Human Activities across the Ordos Plateau, China // *Remote sensing*. 2017. V. 9. № 6. P. 255.
- Kulik K.N., Petrov V.I., Rulev A.S., Kosheleva O.Y., Shinkarenko S.S. K 30-letiyu "General'nogo plana po bor'be s opustynivaniem chernozemov i Kizlyarskih pastbishch [On the 30th anniversary of the "General plan to combat desertification of Black lands and Kizlyar pastures"] // *Arid ecosystems*. 2018. V. 8(1). P. 5–20. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S2079096118010067>
- Kulik K.N., Petrov V.I., Yuferev V.G., Tkachenko N.A., Shinkarenko S.S. Geoinformacionnyy analiz opustynivaniya Severo-Zapadnogo Kaspiya [Geoinformational Analysis of Desertification of the Northwestern Caspian] // *Arid Ecosystems*. 2020. V. 10. № 2. P. 98–105. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S2079096120020080>
- Kulik K.N., Rulev A.S., Yuferev V.G. Geoinformacionnyy analiz ochagov opustynivaniya na territorii Astrahanskoj oblasti [Geoinformation analysis of desertification foci on the territory of the Astrakhan region] // *Arid ecosystems*. 2013. V. 19. № 4. P. 91–98. (In Russian).
- Kulik K.N., Rulev A.S., Yuferev V.G. Geoinformacionnyy analiz dinamiki opustynivaniya na territorii Astrahanskoj oblasti [Geoinformation analysis of desertification dynamics on the territory of the Astrakhan region] // *Arid ecosystems*. 2015. V. 21. № 3. P. 23–32. (In Russian).
- Kuzmina Zh.V., Treshkin S.E. Klimaticheskie izmeneniya v bassejne Nizhnej Volgi i ih vliyanie na sostoyanie ekosistem [Climatic changes in the Lower Volga basin and their impact on the state of ecosystems] // *Arid ecosystems*. 2014. V. 20. № 3(60). P. 14–32. (In Russian).
- Kuznecov A.E., Poshekhonov V.I., Ryzhikov A.S. Tekhnologiya avtomaticheskogo kontrolya tochnosti geopriyazki sputnikovyh izobrazhenij po opornym snimkam ot ka "Landsat-8" [Technology of automatic control of accuracy of geo-linking of satellite images based on reference images from the spacecraft "Landsat-8"] // *Cifrovaya obrabotka signalov*. 2015. № 3. P. 37–42. (In Russian).
- Lyu Y., Shi P., Han G., Liu L., Guo L., Hu X., Zhang G. Desertification Control Practices in China // *Sustainability*. 2020. 12: 3258. <https://doi.org/10.3390/su12083258>
- Rulev A.S. Komp'yuternoe kartografirovaniye prostranstvennogo raspredeleniya gradientov pokazatelej regional'nogo klimata yugo-vostoka Evropejskoj chasti Rossii [Computer mapping of spatial distribution of gradients of indicators of the regional climate of the south-east of the European part of Russia] // *Vestnik VolGU. Geografiya i geoinformatika. Seriya 11*. 2012. № 1(3). P. 72–77. (In Russian).
- Rulev A.S., Kanishchev S.N., Shinkarenko S.S. Analiz sezonnoj dinamiki NDVI estestvennoj rastitel'nosti Zavolzh'ya Volgogradskoj oblasti [Analysis of seasonal dynamics of NDVI natural vegetation of the Volga region of the Volgograd region] // *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2016. V. 13. № 4. P. 113–123. (In Russian).
- Sazhin A.N., Kulik K.N., Vasiliev Yu.I. Pogoda i klimat Volgogradskoj oblasti [Weather and climate of the Volgograd region] Volgograd: VNIALMI. 2010. 306 p.
- Tkachenko N.A. Kachestvennaya ocenka i kartografirovaniye degradacii pahotnyh zemel' Volgogradskogo Zavolzh'ya [Qualitative assessment and mapping of degradation of arable lands of the Volgograd Volga region] // *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2014. № 2(46). P. 21–23. (In Russian).
- Tkachenko N.A., Koshelev A.V. Podverzhennost' processam degradacii sel'skohozyajstvennyh ugodij Volgogradskogo Zavolzh'ya [Susceptibility to degradation processes of agricultural lands of the Volgograd Volga region] // *Nauchno-agronomicheskij zhurnal*. 2019. № 2(105). P. 7–9. (In Russian).
- Yuferev V.G. Distancionnyy monitoring sostoyaniya i dinamiki agrolandshaftov [Remote monitoring of the state and dynamics of agricultural landscapes] // *Agriculture*. 2007. № 3. P. 8–9. (In Russian).
- Vinogradov B.V. Aerokosmicheskij monitoring ekosistem [Aerospace monitoring of ecosystems]. Moscow: Nauka. 1984. 320 p.
- Vinogradov B.V. Distancionnye indikatory opustynivaniya i degradacii pochv [Remote indicators of desertification and soil degradation] // *Soil science*. 1993. № 2. P. 98–103.
- Zonn I.S., Kust G.S., Andreeva O.V. Paradigma opustynivaniya: 40 let razvitiya i global'nye usiliya [Desertification paradigm: 40 years of development and global efforts] // *Arid ecosystems*. 2017. V. 7. № 3. P. 131–141. (In Russian).