

**ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ОПУСТЫНИВАНИЯ  
ТЕРРИТОРИИ КАЛМЫКИИ**

© 2023 г. В.Г. Юферев, В.А. Силова, Н.А. Ткаченко

*Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций  
и защитного лесоразведения Российской академии наук*

*Россия, 400062, г. Волгоград, Университетский пр-т, д. 97. E-mail: vyuferev1@rambler.ru*

Поступила в редакцию 20.10.2022. После доработки 23.11.2022. Принята к публикации 11.12.2022.

Геоинформационные технологии оценки опустынивания аридных территорий обеспечивают определение пространственного положения объектов исследований, а также фиксацию изменений, происходящих на территориях в пространственно-временном аспекте при воздействии климатических и антропогенных факторов, определяющих такие изменения. Дистанционный, пространственно-временной мониторинг заключается в картографировании участков опустынивания с точной географической привязкой объектов и определением произошедших на них изменений с течением времени (Mariam Akhtar-Schuster, 2020). Оценка степени опустынивания основывается на классификации видов опустынивания и методологии дистанционных исследований участков деградации и геоинформационных технологиях (Юферев, 2007). Принимая за основу критерии зон экологического состояния (норма, риск, кризис и бедствие) для различных видов земель сельскохозяйственного назначения (Виноградов, 1984), определяют критерии проведения дистанционного мониторинга зон экологического бедствия с использованием актуальных космоснимков на территории Республики Калмыкия. Использование для мониторинга дистанционных методов оценки опустынивания обеспечивает возможность выявления пространственных изменений, происходящих на территории мониторинга, при изменении уровня воздействия антропогенных и климатических факторов. Математическая и статистическая обработка результатов, полученных при пространственно-временных исследованиях, дают возможность выявить функциональные связи площади опустынивания и величины действующих здесь природных и антропогенных факторов, на основании которых появляется возможность разработки математической модели таких изменений. Такая модель отражает вероятное развитие площади опустынивания в зависимости от фактического сочетания наиболее существенных факторов, поэтому при моделировании важным является выбор таких факторов. Моделирование степени деградации основывается на оценке величины участков (площади), подверженных определенной степени деградации, и математическом описании процессов изменения их состояния. В результате на территории исследования были определены площади опустынивания и изменение площадей этих зон. Проведенный мониторинг опустынивания по данным дистанционной съемки территории Калмыкии позволил определить за период с 1984 по 2020 гг. увеличение площадей, подверженных опустыниванию, практически в 4 раза, с 750 до 3000 тыс. га.

*Ключевые слова:* мониторинг, опустынивание, космоснимки, модель, факторы, изменение.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2023-1-46-52**

**EDN: KQMOFT**

Опустынивание территории Калмыкии определено как нерациональным использованием продуктивных ресурсов пастбищ при общем снижении биомассы растительности, так и климатическим воздействием на эти ресурсы, а именно, уменьшением количества осадков и увеличением повторяемости и продолжительности засух и пыльных бурь. Деградация слабогумусированных светло-каштановых, бурых почв и супесей в условиях аридного климата очень быстро приводит к потере плодородия, оставляя место для рудеральной растительности, включая соответствующие виды псаммофитов и галофитов. Опустынивание территории Калмыкии, в

особенности пастбищных угодий, приводит к обеднению земель по всем характеристикам. При этом воздействие нерегламентированной антропогенной нагрузки и ужесточение климатических условий приводит к уменьшению продуктивности пастбищ и к необратимой деградации почв.

Изучение факторов опустынивания, проведенное до настоящего времени (Виноградов, 1993; Кулик, 2004; Куст, 2002), заложило научное обоснование и методы определения функционирования аридных экосистем, основных факторов их опустынивания, таких как запредельная пастбищная нагрузка и в результате – опустынивание земель, используемых для выпаса скота; использование земель, слабопригодных для выращивания растений. Это привело к увеличению площадей участков опустынивания. Использование орошения сельскохозяйственных земель, без учета залегания солей, приводит к их предельному засолению и опустыниванию. Все эти процессы проходят на фоне повышения засушливости климата, увеличения повторяемости пыльных бурь и продолжительности почвенных и атмосферных засух.

Техногенное воздействие на территорию Калмыкии осложнено увеличением транспортных перевозок полезных ископаемых от мест добычи, проведением работ по добыче ресурсов, а также строительством объектов различного назначения.

В настоящее время исследования проблем опустынивания направлены на совершенствование методологической базы, разработку научных основ борьбы с опустыниванием, восстановление земель аридных территорий и организацию их рационального использования.

Процессы опустынивания на территории Калмыкии имеют тенденцию к нарастанию, поэтому своевременное определение опустыненных участков с использованием регулярного мониторинга обеспечивает возможность за короткое время провести оценку их состояния и динамику изменений, вызванных природным и антропогенным воздействием. Космические снимки являются источниками исходных объективных данных для изучения пространственного распределения участков опустынивания и изменения их площади.

### **Методология и методы**

Развитие технологий мониторинга состояния земель на основе данных дистанционного зондирования Земли основано на использовании космических снимков (Кулик, 2010). Использование снимков сверхвысокого и высокого разрешения спутников семейства World View, Sentinel, Landsat и др. обеспечило возможность детального мониторинга процессов опустынивания аридных территорий.

В настоящее время активно развивается система съемок поверхности Земли различных типов из космоса, что дает возможность получения достоверной информации пространственного распределения и площадей участков опустынивания (Guo, 2017).

В задачи исследований входило компьютерное картографирование участков опустынивания, определение основных факторов, влияющих на изменение пространственного положения участков опустынивания в различные периоды; определение методологической основы картографирования на основе ГИС-технологий пространственно-временного анализа космоснимков.

Основой методологии, применяемой при исследовании процессов опустынивания, является положение о соответствии изображения на снимке реальному состоянию снимаемого объекта. Применение анализа изображений космоснимков для выявления контуров участков опустынивания и геоинформационное определение характеристик их пространственного распределения проводится с применением инструментов геостатистического анализа в программном комплексе QGIS 3.24.

В основе анализа изображения космоснимков территории, подверженной опустыниванию, принята гипотеза о том, что растровое изображение в достаточной мере определяет реальное состояние участка. При проведении геоинформационного анализа изображения опустыненных территорий по результатам мониторинга необходимо учитывать направление как изменения свойств объекта исследований, так и изменение тона пикселей на его изображении.

По результатам анализа и дешифрирования разновременных космоснимков со сравнимыми в пространстве и времени характеристиками (период съемки, фенологическая фаза вегетации ценных видов кормовой растительности, влажность верхнего слоя почвы) создаются геоинформационные картографические слои состояния территории исследований на момент съемки. Создание такого слоя является эффективным средством отображения степени опустынивания территории. При этом

выделяются участки опустынивания, а полученное изображение сравнивается с характеристиками полевых эталонов на тестовых участках. Созданные геоинформационные слои степени опустынивания используются для сравнения изменений ситуации в контурах опустынивания по временным периодам картографирования и тщательного анализа таких изменений. Точность и детализация аналитического геоинформационного слоя динамики опустынивания определяется качеством и разрешением исходного космоснимка.

Основополагающим подходом в методике выявления участков опустынивания является сравнительный анализ их растрового изображения с использованием анализа гистограмм. Гистограмма с распределением энергии по спектральным каналам позволяет выявить величину отраженной электромагнитной энергии, а также установить и ее распределение в растре (Pernar, 2003). Анализ гистограммы распределения отраженной энергии участков опустынивания обеспечивает получение данных по контурам опустынивания.

Полевое эталонирование раstra снимков участков опустынивания проводится для повышения достоверности дешифрирования данных дистанционной съемки.

Выбор участков для изучения опустынивания проводится в процессе составления космокарт территории.

К участкам, предрасположенным к развитию опустынивания, можно отнести:

- дефлированные земли с участками разреженного растительного покрова;
- аридные территории, используемые для производства сельскохозяйственной продукции;
- аридные территории в условиях проявления засух и пыльных бурь;
- слабогумусированные супеси и пески,
- засоленные земли.

На этапе предварительной оценки территории создается обзорная космокарта, используемая для определения координат объектов мониторинга опустынивания. Масштаб обзорной космокарты – 1:1000000, 1:2000000. На обзорную космокарту региона исследований наносятся координатная сетка, границы и атрибутивная информация.

На этапе определения вида опустынивания, степени его опасности и количественной оценки опустынивания применяются карты крупного масштаба – 1:10000, 1:25000. Карты контуров опустынивания разрабатываются на основе космоснимков высокого разрешения.

Таким образом, с использованием геоинформационных технологий на основе дистанционного мониторинга составляются карты участков опустынивания. На таких картах отображается пространственное распределение участков опустынивания, приуроченность таких участков к рельефу, почвенные контуры и их характеристики, растительность (состав сообществ), виды и степень опустынивания территории (Шинкаренко, 2019; Haishuo, 2018).

### **Результаты и обсуждение**

Дистанционный мониторинг опустынивания был проведен на всей территории Калмыкии с использованием геоинформационных технологий и программ по данным космоснимков спутников Landsat 5, 7, 8 в период 1984–2020 гг., полученных с сервиса <https://earthexplorer.usgs.gov>. На основе созданной мозаики космоснимков с разрешением 30 м и точностью позиционирования 12 м были разработаны космокарты территории Калмыкии (рис. 1), результаты дешифрирования которых позволили выделить площади земель, подверженных опустыниванию. К таким землям отнесены участки с разными видами деградации, которая привела к снижению проективного покрытия растительностью на них до значений менее 10%.

Для уточнения характеристик растительных сообществ и почв, а также получения фотоэталонов аридных территорий, к которым относится территория Калмыкии, были проведены полевые исследования на репрезентативных участках. При этом выявлялись состав фитоценозов, проективное покрытие и уровень засоления.

По результатам полевых исследований разработаны эталоны участков поверхности на территории исследований как при полном отсутствии растительности, так и при различных величинах проективного покрытия. Пример фотоэталонов приведен на рис. 2. При эталонировании проведен анализ гистограмм распределения пикселей растрового изображения подстилающей поверхности, что позволило определить среднее значение тона изображения и его стандартное отклонение. Полученные данные дают

возможность автоматизировать анализ изображения и провести его классификацию с выделением участков, подверженных деградации в условиях аридного климата, то есть опустыниванию (рис. 3).

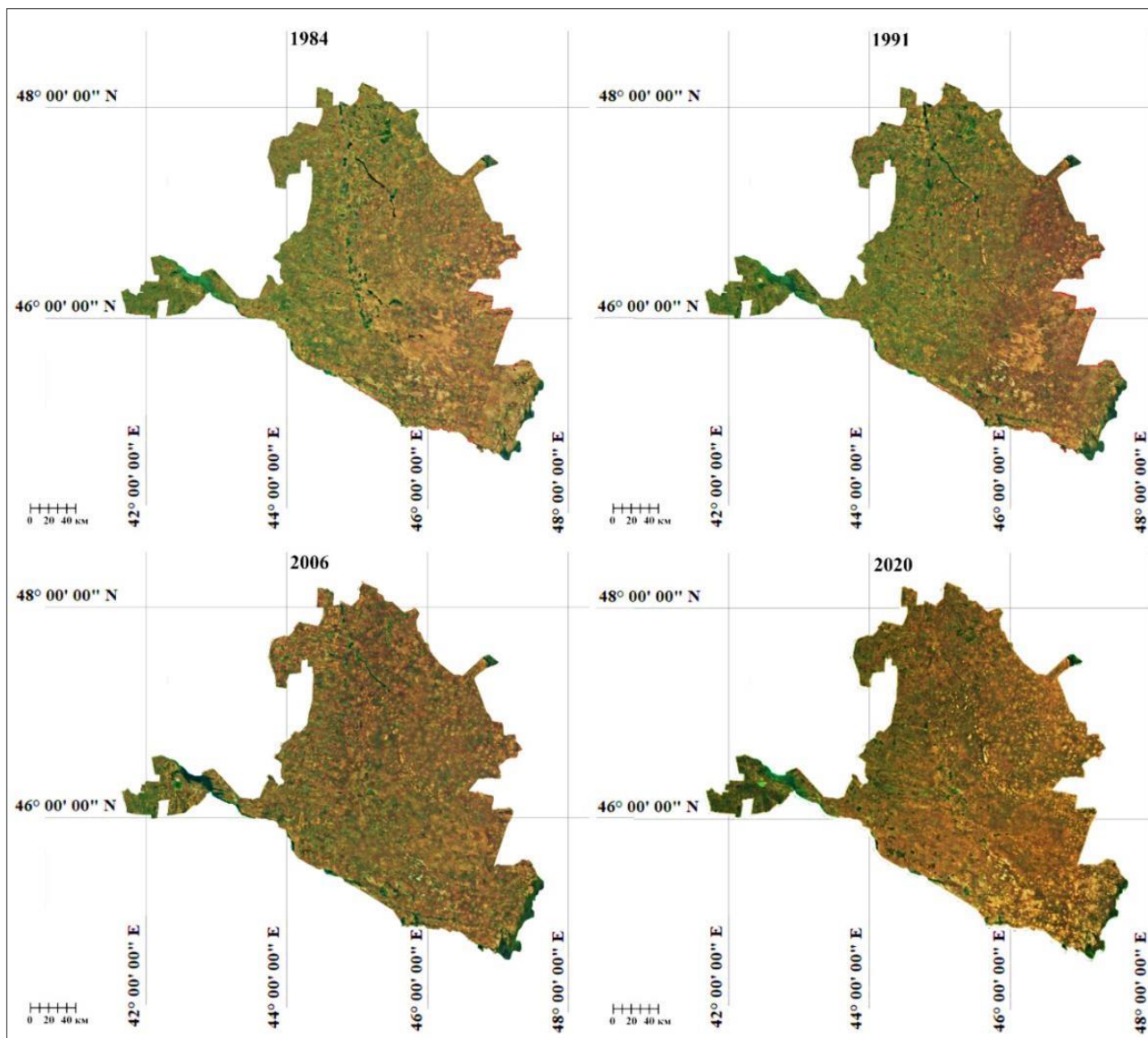


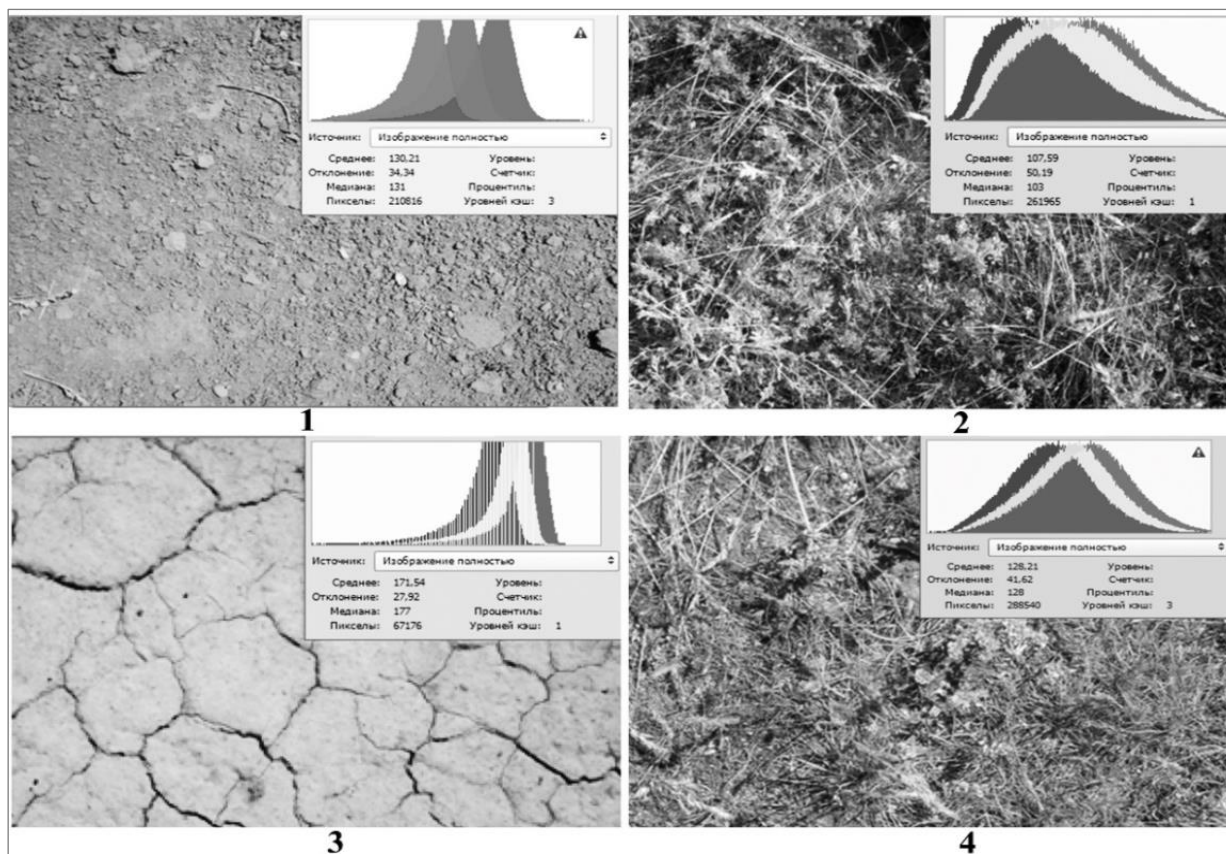
Рис. 1. Разновременные космоскопты Калмыкии

По результатам дешифрирования участков опустынивания с проективным покрытием менее 10% были разработаны карты участков опустынивания по годам мониторинга с 1984 по 2020 гг. (мозаики спутников Landsat 5, 7, 8), примеры см. на рис. 3. По полученным картам разработана локальная ГИС опустынивания территории Калмыкии, определено пространственное распределение участков и их площади.

В итоге проведенного мониторинга осуществлен анализ изменения площади опустынивания  $S_{on}$  по годам исследований  $t$ , который позволил разработать уравнение регрессии на основе логистической функции с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0.74$ , с определением коэффициентов аппроксимации в виде:

$$S_{on} = 3960 / (1 + 223 \exp 0.2709) + 339.$$

На рис. 4 показан график изменения площади опустынивания территории Калмыкии в период с 1984 по 2020 г. и результат моделирования изменения площади опустынивания.



**Рис. 2.** Фотоэталон деградированных (1), засоленных (3) почв при отсутствии проективного покрытия; фотоэталон с проективным покрытием: *Artemisia lercheana* Weberex Stechm + *Festuca valesiaca* Gaudin (2) – 38%, *Poa bulbosa* L. (4)– 55%.

### Выводы

Проведенный мониторинг опустынивания по данным дистанционной съемки территории Калмыкии позволил определить увеличение площадей за период с 1984 по 2020 г., подверженных опустыниванию практически в 4 раза – с 750 до 3000 тыс. га. Такое увеличение неравномерно по годам и обусловлено воздействием на аридные экосистемы Калмыкии как природных, так и антропогенных факторов. Антропогенные факторы связаны в большей степени с увеличением нагрузки на пастбища, с путями перегона животных, с их концентрацией при водопое и в кошарах. В меньшей степени они связаны с развитием сети полевых дорог и с перемещением транспорта по дорогам-дублерам, что приводит к уничтожению растительности в колеях.

Закономерность увеличения площади земель подверженных опустыниванию можно описать уравнением регрессии  $S_{on} = 3960 / (1 + 223 \exp 0.2709) + 339$ , с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0.74$ . Использование этого уравнения с достаточно высокой степенью достоверности дает возможность прогнозировать изменение площади опустыненных территорий и планировать необходимые работы по их реабилитации.

С увеличением площадей, не покрытых растительностью, возрастает концентрация животных на оставшихся площадях, соответственно возрастает нагрузка и степень деградации растительности.

Климатические условия оказывают существенное влияние на экосистемы. Это влияние обусловлено не только небольшим количеством и структурой выпадения осадков, но и влиянием пыльных и песчаных бурь, частота которых в последние годы увеличилась. Проявления таких бурь отмечены в 2020, 2021 и 2022 г.

В связи с этим необходимо отметить, что для сохранения и восстановления аридных экосистем на территории Калмыкии необходимо проведение фитомелиоративных мероприятий как по закреплению подвижных песков, так и по повышению пищевой ценности сбитых в различной степени пастбищ ценными видами травянистой и древесной растительности.



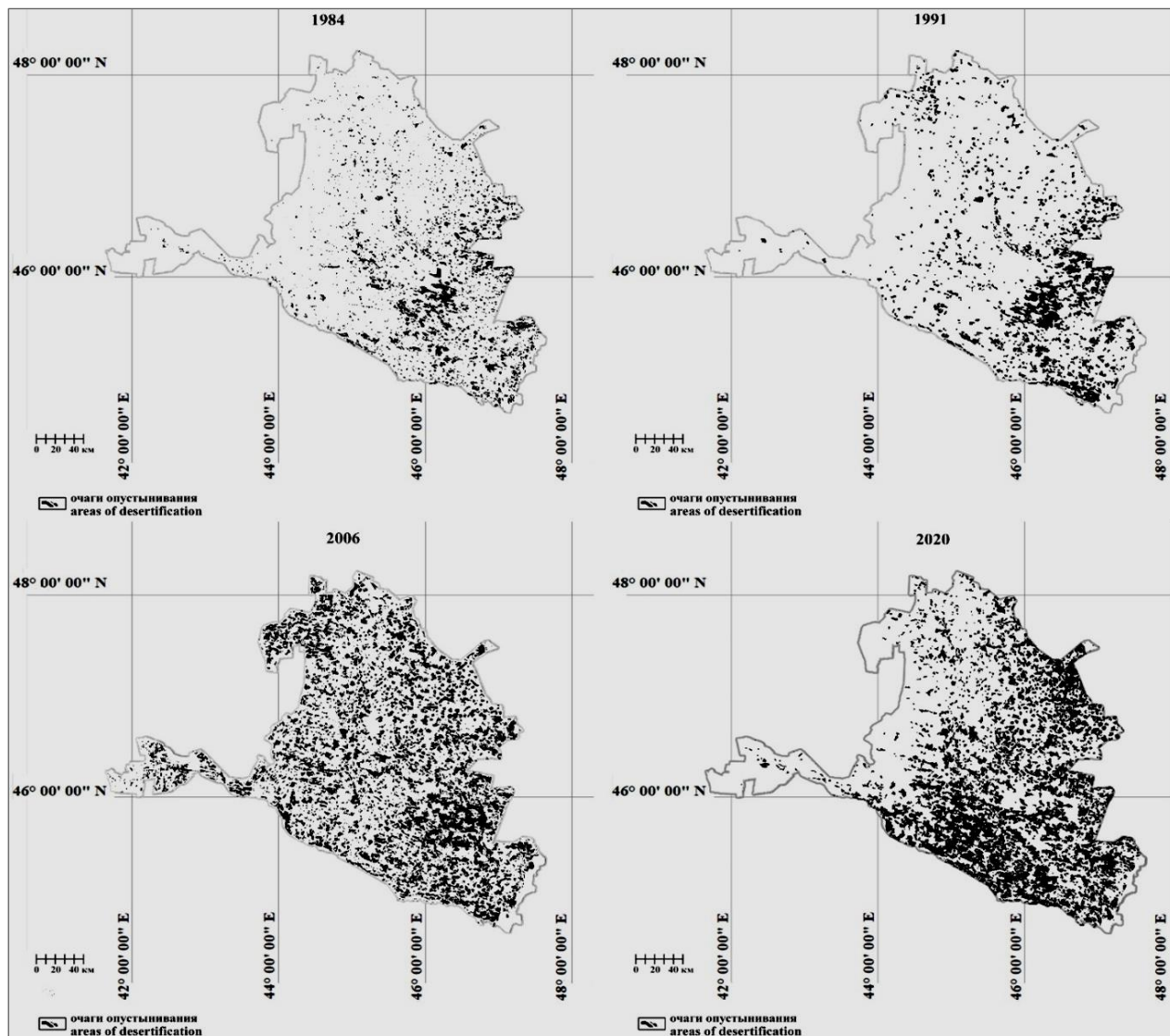


Рис. 3. Карты расположения участков опустынивания

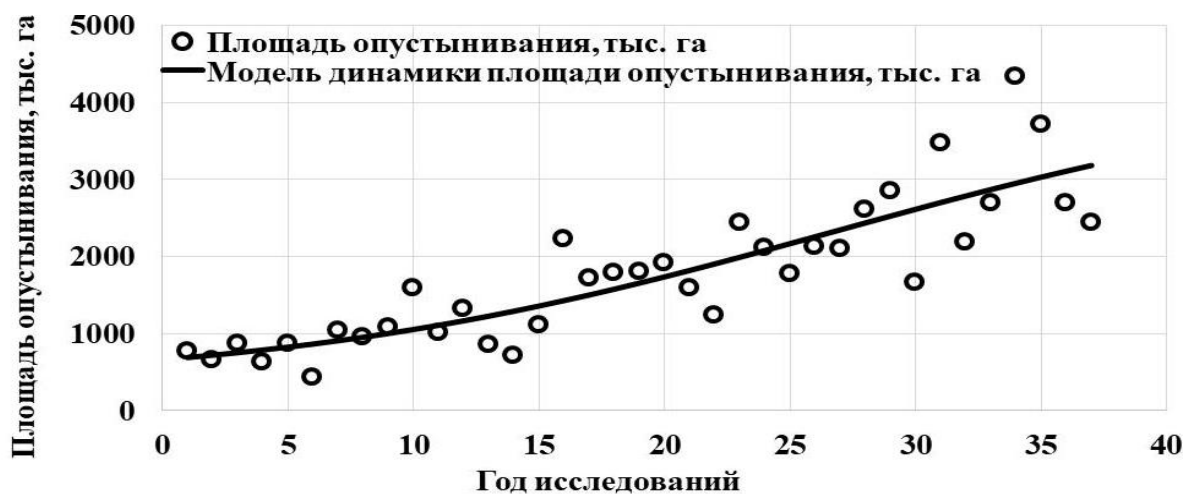


Рис. 4. Площади опустынивания территории Калмыкии в период 1984-2020 гг. и модель изменения площади опустынивания.

*Финансирование.* Работа выполнена в рамках Госзадания ФНЦ агроэкологии РАН, госрегистрация № 122020100311-3 по теме FNFE-2022-0003 «Теоретические основы функционирования и природно-антропогенной трансформации агролесоландшафтных комплексов в переходных природно-географических зонах, закономерности и прогноз их деградации и опустынивания на основе геоинформационных технологий, аэрокосмических методов и математико-картографического моделирования в современных условиях».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградов Б.В.* 1984. Аэрокосмический мониторинг экосистем. М: Наука. 380 с.
- Виноградов Б.В.* 1993. Дистанционные индикаторы опустынивания и деградации почв // Почвоведение. № 2. С. 98-103.
- Кулик К.Н.* 2004. Агролесомелиоративное картографирование и фитоэкологическая оценка аридных ландшафтов. Волгоград: ВНИАЛМИ. 248 с.
- Кулик К.Н., Рулев А.С., Юферев В.Г., Мушаева К.Б., Кошелев А.В., Дорохина З.П., Березовикова О.Ю.* 2010. Геоинформационные технологии в агролесомелиорации. Волгоград: ВНИАЛМИ. 102 с.
- Куст Г.С., Глазовский Н.Ф., Андреева О.В., Шевченко Б.П., Добрынин Д.В.* 2002. Основные результаты по оценке и картографированию опустынивания в Российской Федерации // Аридные экосистемы. Т. 8. № 16. С. 7-27.
- Шинкаренко С.С.* 2019. Пространственно-временная динамика опустынивания на Чёрных землях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 16. № 6. С. 155-168.
- Юферев В.Г.* 2007. Дистанционный мониторинг состояния и динамики агроландшафтов // Земледелие. № 3. С. 8-9.
- Guo Q., Fu B., Shi P., Cudahy T., Zhang J., Xu H.* 2017. Satellite Monitoring the Spatial-Temporal Dynamics of Desertification in Response to Climate Change and Human Activities across the Ordos Plateau. China // Remote sensing. Vol. 9.No. 6.P. 255.
- Haishuo Wei, Wang Juanle, Cheng Kai, Li Ge, Ochir Altansukh, Davaasuren Davaadorj, Chonokhuu Sonomdagva.* 2018. Desertification Information Extraction Based on Feature Space Combinations on the Mongolian Plateau // Remote Sens. No10(10). 1614p.
- Mariam Akhtar-Schuster, Bigas Harriet, Thomas Richard, Chasek Pamela, Reed Mark.* 2010. Monitoring and assessment of desertification, land degradation and drought: knowledge management, institutions and economics: White Paper of the DSD Working Group 3 // UNU-INWEH/9. 126 p.
- Pernar R., Klobucar D.* 2003. Estimating stand density and condition with the use of picture histograms and visual interpretation of digital orthophotos // Annales experimentis silvarum culturae provehendis. Zagreb: Universitas studiorum Zagrebiensis, Facultas forestalis. Vol. 40. P. 81-111.