АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2020, том 26, № 2 (83), с. 16-24

СИСТЕМНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 631.6.02

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ОПУСТЫНИВАНИЯ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ПРИКАСПИЯ[1]

© 2020 г. К.Н. Кулик, В.И. Петров, В.Г. Юферев, Н.А. Ткаченко, С.С. Шинкаренко

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН
Россия, 400062, г. Волгоград, Университетский просп., д. 97.
E-mail: natulyat@mail.ru, kulikkn@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.05.2019. После доработки 01.07.2019. Принята к публикации 04.07.2019.

Анализ динамики современного опустынивания Северо-Западного Прикаспия с использованием геоинформационных технологий и аэрокосмических данных показал, что площадь деградированных и опустыненных земель в регионе увеличивается за счет усиления антропогенного фактора (пастбищная нагрузка). При относительно стабильном количестве животных возрастает роль климатических факторов, что приводит к увеличению скорости и амплитуды изменений площади очагов опустынивания, как в сторону уменьшения, при достаточном увлажнении, так и увеличения в засушливые годы. Значительное влияние оказывают пожары, которые приводят не только к снижению проективного покрытия, но и к обеднению видового состава растительности. Изучение и картографирование рельефа позволило установить пространственно определенные геоморфологические особенности территории как фактора, влияющего на локальное увлажнение, и соответственно на устойчивость экосистем и возможность фитомелиорации.

Ключевые слова: геоинформационные системы, анализ, опустынивание, деградация, картографирование, моделирование, космические снимки, очаги, площадь, корреляция, регрессия, фитомелиорация.

DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10091

За исторический период опустынивание Северо-Западного Прикаспия имело несколько вспышек, вызванных как климатогенными, так и антропогенными факторами (Гаель, 1973). Особенно сильное развитие антропогенное опустынивание получило в 60-80-х годах XX века. В 1986 г. здесь имелось свыше 700 тыс. га подвижных песков, возникших в основном за счет перевыпаса и распашки легких почв под посевы сельскохозяйственных культур, что привело к катастрофическому положению социально экономической сферы региона (Кулик, Петров, 2016; Генеральная схема …, 1986; Национальная программа …, 1995; Субрегиональная национальная …, 1999).

В результате нерационального использования территории увеличивается площадь открытых, лишенных полностью растительности участков, что усугубляется неравномерностью и недостаточным количеством осадков для восстановления фитоценозов (Виноградов и др., 2000; Золотокрылин и др., 2016; Деградация земель и опустынивание …, 2019). Геоинформационный анализ пространственно-временного развития опустынивания ландшафтов является современным инструментом сбора координатно-определенной (геокодированной) информации о площади и скорости такого процесса (Kulik et al., 2013).

Территория Северо-Западного Прикаспия относится к молодой морской равнине, с относительно

[1] Работа выполнена в рамках Госзадания НИР № 0713-2019-0001 «Провести теоретическое и геоинформационное моделирование, мониторинг, прогноз процессов деградации компонентов агролесоландшафтов на основе аэрокосмических исследований в лесостепной, степной и пустынной зонах и разработать способы управления противодеградационными агролесомелиоративными технологиями предотвращения опустынивания земель, повышения их плодородия и формирования экологического каркаса» и при финансовой поддержке РФФИ и Волгоградской области в рамках научного проекта № 19-45-340003 "Научное обоснование и закономерности изменения состояния ландшафтов экотона Малый Сырт – Прикаспийская низменность в Волгоградском Заволжье".

маломощными почвами. Толщина гумусированного слоя не превышает 30 см на каштановых и светло-каштановых почвах, значительно меньше на бурых полупустынных почвах и практически отсутствует на песках. Гранулометрический состав в основном песчаный и супесчаный, в северной части территории исследований до тяжелосуглинистого, с преобладанием по площади песков, что позволяет отнести ландшафты Северо-Западного Прикаспия к категории неустойчивых. Любое экстремальное воздействие на почвенный покров может привести к нарастанию процессов деградации и к опустыниванию территорий (Zanozin et al., 2014; Kulik et al., 2013, Ткаченко, 2014).

В связи с этим геоинформационный анализ процессов деградации и опустынивания в Северо-Западном Прикаспии, использование моделирования и картографирования для оценки связи этих процессов с величиной и типом воздействия является актуальным (Виноградов, 1998; Kulik et al., 2013; Шинкаренко, 2019).

Материалы и методы

Методика исследования деградации и опустынивания ландшафтов Северо-Западного Прикаспия основана на разработанных способах оценки состояния компонентов ландшафтов (Патент RU № 2327107 …, 2008; Патент № 2265839 …, 2005). Особое значение для исследований имеют геоинформационные методы, обеспечивающие возможность выявления деградации и опустынивания в пространственно-временном аспекте, с учетом природных и антропогенных воздействий (Sapanov et al., 2015; Виноградов и др., 2000; Pernar, Klobucar, 2003). Процессы деградации и опустынивания, изменения состояния ландшафтных объектов Северо-Западного Прикаспия обусловлены сезонной сменой климатических условий, годовой цикличностью увлажнения, изменением среднегодовой и сезонной суммы температур, а также антропогенным воздействием, связанным как с использованием естественных ресурсов, так и с трансформацией территории. Выявление уровня деградации базируется на анализе изображения аэро- и космоснимков и последующем сравнении изменений состояния рельефа, почв и растительности с фотоэталонами, получаемыми при фотографировании участков с уровнем деградации, установленных при полевых исследованиях. Математическое описание основано на геоинформационном анализе пространственно-временных изменений объектов исследований. Регрессионный анализ динамических процессов изменения состояния ландшафтов обеспечивает разработку уравнений по адекватной математической функции с определенным уровнем доверительной вероятности и, соответственно, определение коэффициентов аппроксимации. Моделирование пространственного изменения площади деградированных и опустыненных участков осуществляется с использованием полученных уравнений, при этом разрабатывают геоинформационные картографические слои, отражающие прогноз состояния ландшафтов. Составление прогноза деградации ландшафтов основано на методах пространственно-временного подобия, экологических рядов и др. Прогноз деградации сложных ландшафтных систем основан на изучении пространственно-временной статистики, выявлении закономерностей и установлении динамики изменений их компонентов (Виноградов, 1998; Салугин, Кулик, 2006).

Объекты исследований выбираются в соответствии с поставленной задачей: выявление закономерностей деградации и опустынивания ландшафтов на территории Республики Калмыкия, Волгоградской и Астраханской областей. При камеральных исследованиях проводится дешифрирование и анализ изображений ландшафтов, при этом территории, занятые природными засоленными почвами и солончаками, считаются ограниченно используемыми и отнесены к классу сильно деградированных пастбищ (Дворкин, 2011).

Источниками данных дистанционного зондирования для анализа ландшафтов являются мультиспектральные снимки, получаемые со спутников Ресурс П, Канопус, Spot 6, Worldview 3, Sentinel 2, Landsat-8, и данные глобальных цифровых моделей рельефа (Центр научных данных …, 2018; SRTM …, 2018).

Опустынивание территории Северо-Западного Прикаспия проявляется как в уменьшении проективного покрытия, так и в снижении видового разнообразия травяной растительности, в том числе деструкции почвенного покрова и образовании очагов открытых, подвижных песков. Установлено, что проективное покрытие определенного фитоценоза с достаточной вероятностью определяет его продуктивность, что дает возможность применять аэрокосмоснимки для оценки продуктивности пастбищ. Ошибка определения проективного покрытия при этом не превышает 5% (Виноградов, 1998).

Исходные показатели деградации земель, выраженные в гектарах, были преобразованы в форму индексов деградации (ИД), отражающих по 100-бальной шкале пораженность территории с той или иной формой деградации. Каждой форме деградации соответствует свой индекс деградационной опасности: эродированность – ИДэ, дефлированность – ИДд, засоление – ИДз. Индексы деградации рассчитывались по следующей формуле В.И. Петрова (Генеральная схема …, 1986; Национальная программа …, 1995; Субрегиональная национальная …, 1999):

$$ИД = 100 \cdot \frac{\textit{пораженная часть территории, га}}{\textit{общая площадь территории, га}} \quad (1),$$

Суммарный ИД территориальной единицы (поля, хозяйства, района и т.д.) является средневзвешенной суммой ИД пашни, пастбищ, сенокосов и других входящих в нее угодий. В свою очередь ИД каждого вида угодий складывается из индексов их деградации от дефляции, эрозии и засоления. При совместном проявлении нескольких форм деградации (например, дефляция+засоление) состояние угодий отражается суммарным индексом, значение которого может превышать 100 баллов.

Для биоклиматической оценки аридности засушливого пояса России использован нормализованный индекс аридности NIA, позволяющий соотносить его возрастание по мере усиления засушливости территорий и определяющийся по формуле:

$$\mathrm{NIA} = 1 - \frac{\sum_{I-IX} P}{5.12 \sum_{IV-X} t + 306} \quad (2),$$

где $\sum_{I-XII} P$ – годовая сумма атмосферных осадков, $\sum_{IV-X} t$ – сумма среднемесячных температур с апреля по октябрь (Агролесомелиорация, 2006).

Обсуждение и результаты

Картографирование опустынивания с целью определения ареалов распространения деградации земель, форм и степени его проявления, а также оценки последствий необходимо для визуализации и обоснования основных направлений и выбора путей последующей реализации мер в генеральных схемах и проектах, ориентированных на нейтрализацию опустынивания.

Территория Северо-Западного Прикаспия относится к Восточно-Европейско-Прикаспийской провинции северной зональной катены опустынивания (Виноградов, 1998). Это наиболее крупная (общая площадь 657.9 тыс. км^2) и самая опустыненная часть аридного пояса России, а также самая опустыненная территория России и Европы. Здесь сосредоточено около 13 млн. га сельскохозяйственных угодий со средневзвешенным средним индексом суммарной деградации, составляющим 54.5 балла. В таблице 1 приведены площадь и средневзвешенные средние индексы суммарной деградации территории Республики Калмыкии, Астраханской и Волгоградской областей. Меридиональный градиент суммарного индекса деградации сельскохозяйственных угодий в европейской части аридного пояса составляет 2 балла на 100 км.

Таблица 1. Площадь и средневзвешенные средние индексы суммарной деградации сельхозугодий.

Административная географическая единица	Площадь угодий, тыс. га		ИДс
	общая	опустыненная	
1. Средне и сильно аридные территории (NIA>0.60)			
Республика Калмыкия	5659.4	4867.1	86.0
Астраханская область	2807.7	1374.9	49.0
2. Умеренно аридные территории (NIA=0.40-0.60)			
Волгоградская область	7308.4	3797.0	52.0

В Республике Калмыкия и Астраханской области (NIA>0.60) сосредоточены земли сильного и среднего природного и вторичного засоления, приуроченные к Прикаспийской низменности – равнинам с абсолютными отметками местности ниже 30 м, почвами преимущественно легкого

гранулометрического состава, а также к берегам рек и водохранилищ, освоенным под орошение. Дефляцией охвачены главным образом юго-восточные районы Калмыкии и Астраханской области. Средневзвешенные индексы деградации сельхозугодий в Калмыкии 86.0 балла, а в Астраханской области всего лишь 49.0 балла, что объясняется огромной демпфирующей ролью Волго-Ахтубинской поймы, принимающей и гасящей избыточную антропогенную нагрузку с прилегающих земель области. В районах Калмыкии (Лаганском, Черноземельском и Яшкульском) на площади около 3.2 млн. га индекс суммарного опустынивания изменяется от 120 до 160 баллов, а на долю сильно и средне деградированных угодий приходится 46-69% затронутой опустыниванием территории. В Волгоградской области (NIA=0.40-0.60) индекс суммарной деградации 52 балла.

Современное состояние земель на этой территории свидетельствует о снижении устойчивости экосистем к деградации по мере аридизации климата. Меридиональный градиент суммарного индекса деградации сельскохозяйственных угодий в европейской части аридного пояса составляет 2 балла на 100 км.

Формы деградации, такие как засоление, эрозия и дефляция, определяются комплексом природных и антропогенных факторов. Для аридных территорий особенно важными из числа природных факторов являются соотношение среднегодовых осадков с годовой эвапотранспирацией, гранулометрический состав почвогрунтов, рельеф местности. К важнейшим антропогенным факторам относятся характер и интенсивность аграрной деятельности. Сочетание этих факторов определило довольно четкую дифференциацию сельскохозяйственных угодий аридного пояса по основным формам деградации земель в пространственной динамике.

На долю земель, затронутых засолением, эрозией и дефляцией, приходится 38.5, 21.6 и 39.9% сельхозугодий соответственно (табл. 2). Астраханская область практически не затронута эрозией, но здесь нет недефлированных территорий. На рассматриваемой территории дефляцией затронуто более 3 млн. га сельхозугодий, что составляет 28.6% площади деградированных земель. Крупный ареал современного опустынивания сформировался в начале 70-х годов XX века на пастбищах в Республике Калмыкия. В 1976-1986 гг. скорость дефляционного опустынивания там достигала 40-60 тыс. га/год. В настоящее время лавинообразная деградация подавлена методами комплексной фитомелиорации, но влияние экологической катастрофы неблагоприятно отразилось на агроэкологии и социально-экономической сфере прилегающих маргинальных земель (Петров, Власенко, 2017).

Состояние каждого вида угодий определяется многими природными и антропогенными факторами и изменяется в обширном диапазоне, о чем свидетельствует значительное варьирование (от 19 до 101.5 балла) суммарных индексов их деградации (табл. 3, рис. 1).

Таблица 2. Формы и площадь деградации сельхозугодий.

Административная географическая единица	**Засоление**	**Эрозия**	**Дефляция**	**Всего**
	тыс. га			
Республика Калмыкия	2423.5	516.1	2469.8	5409.4
Астраханская область	1012.4	0.7	498.3	1511.4
Волгоградская область	1436.4	2220.5	87.3	3744.2
Итого:	4872.3	2737.3	3055.4	10665.0

Таблица 3. Средние средневзвешенные суммарные ИД основных видов сельхозугодий.

Административная единица	**Пашня**	**Пастбища**	**Сенокосы**
	балл		
Республика Калмыкия	35.7	101.5	29.8
Астраханская область	46.0	77.2	45.8
Волгоградская область	35.8	61.7	19.0

При геоинформационном анализе особенностей рельефа определены пространственные данные, представленные на рисунке 2.

Для изучения особенностей изменения абсолютных высот рельефа, связанных с изменением литологических и почвенных условий в ландшафтах исследуемой территории, на основе цифровой модели местности SRTM 3 была выбрана линия основного направления и построен профиль (рис. 3). Характеристики профиля: координаты начальной точки – 50° 11' 20" с.ш., 46° 30' 24" в.д., начальная высота – 18 м н.у.м. БС; координаты конечной точки – 45° 01' 55" с.ш., 46°58' 37" в.д., конечная высота – -28 м н.у.м. БС; длина профиля – 600.6 км; перепад высот от начальной до конечной точки – 46.5 м, минимальная высота – -30.2 м н.у.м. БС; максимальная высота – 30 м н.у.м. БС, азимут – 176° 17' 41", средний угол склона – 0°, максимальный угол склона – 6.4°.

В результате анализа изменения высот (Н, м) по длине профиля (x, км) было разработано уравнение регрессии (3) и получены коэффициенты аппроксимации:

$$H=\frac{65.3}{e^{(x+7.87)^2/261121}}-40.8 \qquad (3),$$

коэффициент R^2=0.989.

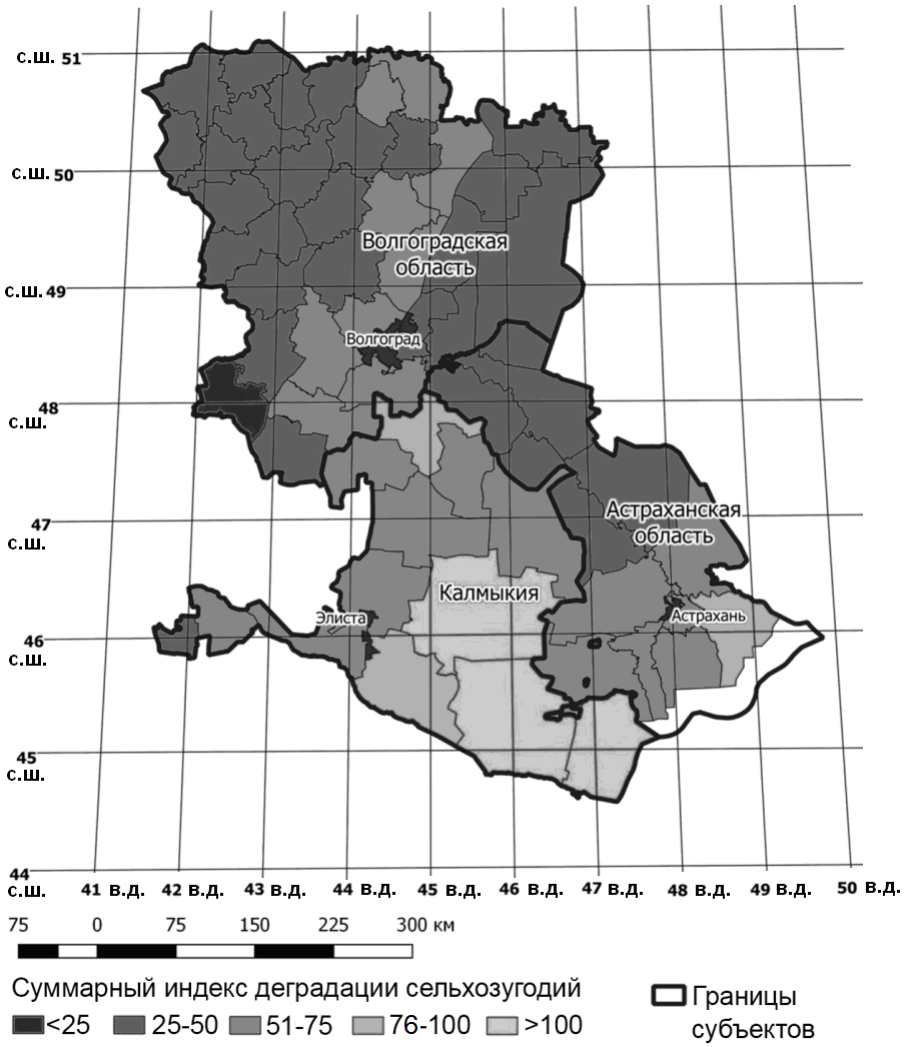


Рис. 1. Суммарные индексы деградации сельхозугодий.

Полученная модель показывает меридиональное изменение абсолютной высоты с севера на юг и дает возможность установить связанное с этой высотой изменение стандартных значений атмосферного давления и температуры, геоморфологические особенности территории как фактора, влияющего на локальное увлажнение и, соответственно, на устойчивость экосистем.

Результаты исследования по цифровой модели рельефа пространственного распределения

понижений от западин до лиманов обеспечивают возможность реализации фитомелиорации как каркаса восстановления растительных сообществ на опустыненных землях.

Карты пространственного распределения и площади деградированных земель составлялись с использованием различных тематических модулей на платформе геоинформационного программного комплекса QGIS путем классификации изображений разновременных космоснимков с учетом почвенных и геоморфологических условий и типов ландшафтов.

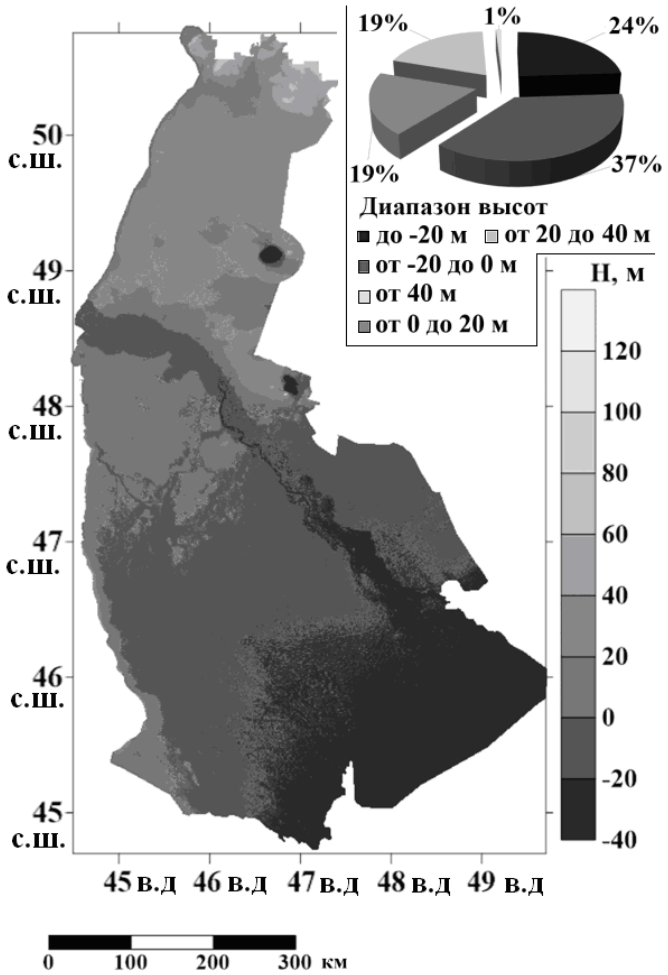


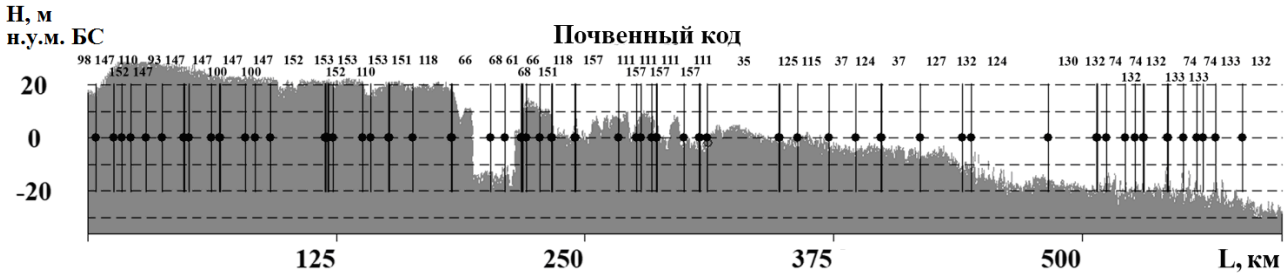
Рис. 2. Изолинейная карта диапазонов высот и распределение площади на территории исследований по диапазонам высот.

Пожары являются одним из факторов, влияющих на функционирование аридных ландшафтов и опустынивание земель. Геоинформационный анализ пожаров в Северном Прикаспии в летний период 2018 года позволил установить (Шинкаренко, 2019) 171 степной пожар общей площадью 6.7 тыс. км^2, из которых 2.6 тыс. км^2 пришлось на Волгоградскую область (109 пожаров), 2.5 тыс. км^2 на Астраханскую (39 пожаров) и 1.6 тыс. км^2 на Калмыкию (27 пожаров). В Астраханской области, волгоградском Заволжье и Калмыкии большая часть выгоревших площадей затронута относительно небольшим количеством очень крупных пожаров (средняя площадь степных пожаров в 2017 году составила примерно 140 км^2). Это связано со спецификой хозяйственного использования территории. Площадь очагов природных пожаров возрастает от степных к пустынным ландшафтам. В условиях тотальной распашки степей пожары на участках естественной растительности возникают только по различным неудобьям и имеют относительно небольшую площадь. В пустынных и полупустынных ландшафтах преобладает пастбищное природопользование, а на территориях с низкой плотностью населения и животноводческих хозяйств огонь распространяется на значительные пространства. Замещение сообществ полукустарничков (*Artemisia* spp., *Kochia prostrata* (L.) Schrad. и др.) на выгоревших участках эфемерами (*Poa bulbosa* L., *Anisantha tectorum* (L.) Nevski и др.) и дерновинными злаками (*Stipa* spp., *Agropyron* spp.) только способствует увеличению частоты пожаров. Эти растения заканчивают вегетацию в июне и к началу пожароопасного периода представляют собой легковоспламеняемый горючий материал (Шинкаренко, 2019).

Для примера рассмотрена территория Астраханской области. В результате проведенных полевых исследований, эталонирования почв и растительности по космическим снимкам были уточнены дешифровочные признаки деградации и опустынивания территории и актуализированы карты уровней деградации (рис. 4). Установлено, что площадь очагов опустынивания в 2018 году составила 1043 тыс. га.

На рисунке 5 приведены результаты многолетних наблюдений изменения площади очагов

опустынивания и изменения поголовья овец и коз, установлена тенденция к дальнейшему увеличению площади очагов опустынивания: продолжается рост площадей с проективным покрытием менее 10%, а характер этого процесса соответствует прогнозной модели.



Алювиальные (61-69) **Бурые с солонцами (123-127)** **Светлокаштановые с солонцами (110-118)**
Бурые (35-37) **Каштановые с солонцами (93-100)** **Солонцы с бурыми (157, 158)**
Бурые с песками (130-133) **Пески (71-75)** **Солонцы с каштановыми (146-149)**

Рис. 3. Профиль рельефа на территории исследований и распределение почвенных контуров по профилю.

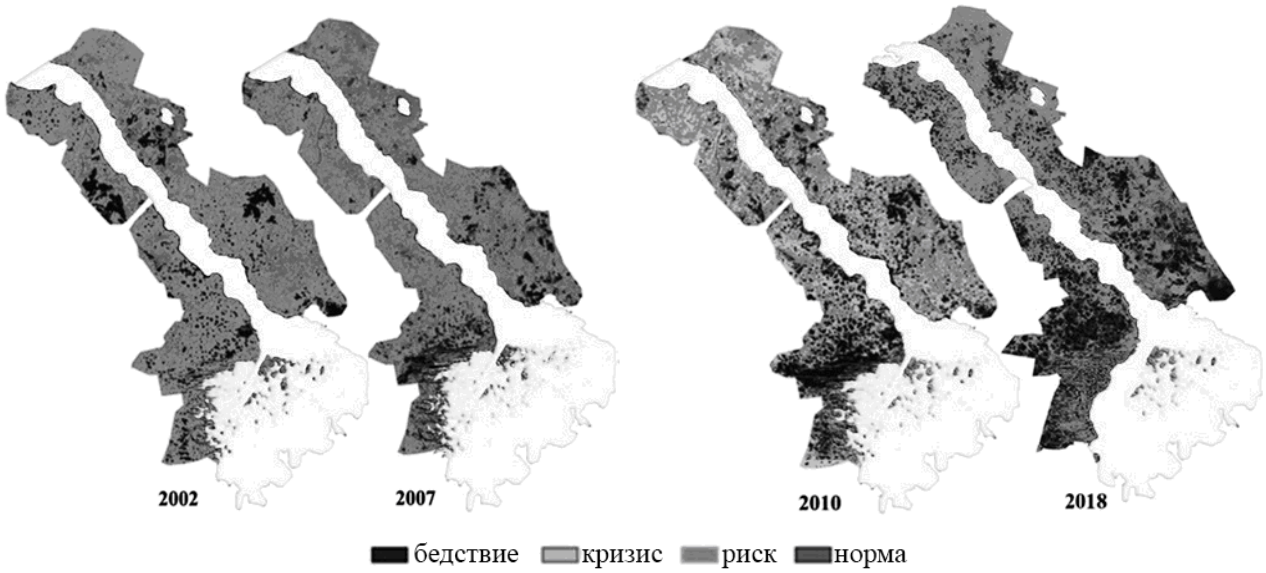


Рис. 4. Динамика деградации и опустынивания ландшафтов Астраханской области**.**

Разработанная в 2010 году модель, представленная уравнением (4), дает адекватные значения прогноза при описании изменения площади деградации и опустынивания ландшафтов. Вследствие этого разработанную модель можно использовать для прогноза деградации ландшафтов Астраханской области:

$$Sб=\frac{316000}{0.531+285\cdot e^{-0.807\cdot t}}+415882 \quad (4),$$

где Sб – площадь деградированных участков (Бедствие), га; t – время от начала исследований, год. Среднеквадратическая ошибка (RMSE) составляет 1441.

Динамику процесса можно оценить по скорости изменения площади опустынивания (Vsб) при дифференцировании уравнения (4):

$$Vсб=\frac{72678420}{(0.531+285\cdot e^{-0.807\cdot t})^2} \quad (5).$$

Эти уравнения позволяют прогнозировать динамику опустынивания ландшафтов. Коэффициент корреляции r=0.74.

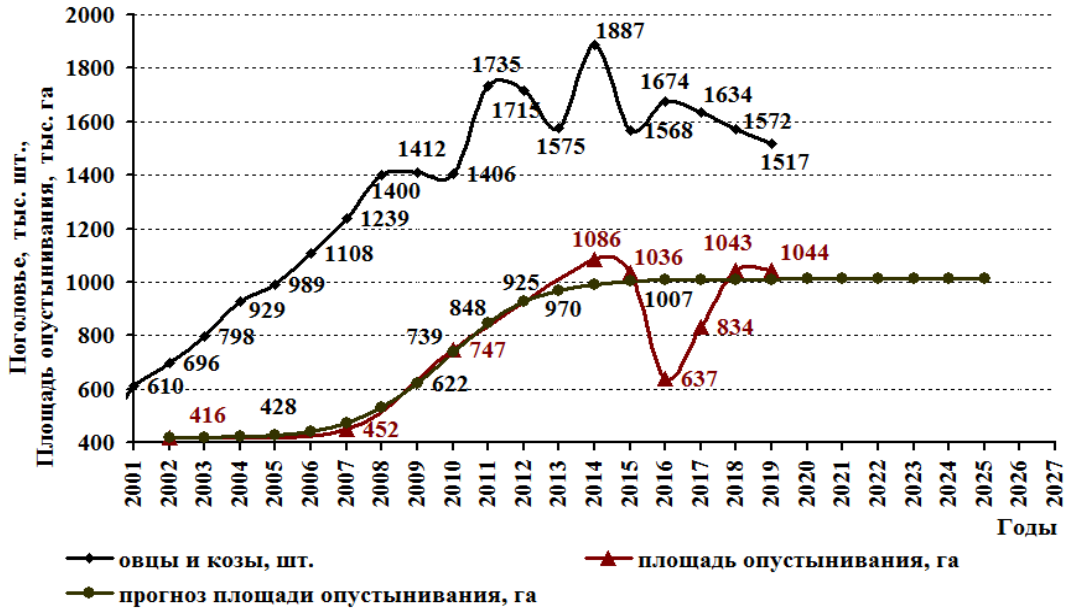


Рис. 5. Изменение площади опустынивания ландшафтов и поголовья скота в Астраханской области с 2002 по 2018 гг.

Заключение

Геоинформационный анализ опустынивания Северо-Западного Прикаспия показал, что в современных условиях идет снижение устойчивости экосистем по мере аридизации климата. Меридиональный градиент суммарного индекса деградации сельскохозяйственных угодий в европейской части аридного пояса составляет 2 балла на 100 км. Формы деградации земель определяются комплексом природных и антропогенных факторов. Особенно важными из числа природных факторов являются соотношение среднегодовых осадков с годовой эвапотранспирацией, гранулометрический состав почв, рельеф местности, а к важнейшим антропогенным факторам относятся характер и интенсивность аграрной деятельности. Определение состояния ландшафтов с использованием геоинформационных технологий и аэрокосмических данных, выявление изменения площади очагов опустынивания на территории Астраханской области показало, что площадь деградированных и опустыненных земель увеличивается при росте поголовья овец и коз с 2002 по 2011 год. При относительно стабильном количестве животных в 2011-2018 годах (среднее количество 1670 тыс. шт., стандартное отклонение 109 тыс. шт.) возрастает роль климатических факторов, что приводит к увеличению скорости и амплитуды изменений площади очагов опустынивания как в сторону уменьшения при достаточном увлажнении, так и увеличения в засушливые годы. Значительное влияние оказывают пожары, которые приводят не только к снижению проективного покрытия, но и к обеднению видового состава растительности, доминированию рудеральных видов, а также формированию сообществ эфемеров (*Poa bulbosa* L., *Anisantha tectorum* (L.) Nevski и др.) и дерновинных злаков (*Stipa* spp., *Agropyron* spp.), замещающих полукустарнички (*Artemisia* spp., *Kochia prostrata* (L.) Schrad. и др.). Для сохранения качественного состава биоценозов и проективного покрытия особенно в засушливые годы требуется как регулирование пастбищных нагрузок, так и проведение фитомелиоративных работ на территориях, подверженных деградации и опустыниванию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агролесомелиорация. 2006 / Ред. А.Л. Иванов, К.Н. Кулик. Волгоград: ВНИАЛМИ. 746 с.

Виноградов Б.В. 1998. Основы ландшафтной экологии. М.: Геос. 418 с.

Виноградов Б.В., Кошель С.М., Кулик К.Н. 2000. Прогнозирование пространственно-временной динамики экосистем методом универсального кригинга // Экология. № 5. С. 323-332.

Гаель А.Г. 1973. Об использовании Черноземельских пастбищ в Калмыкии // Эрозия и русловые процессы. Вып. 3. С. 198-218.

Генеральная схема по борьбе с опустыниванием Черных Земель и Кизлярских пастбищ 1986. Ростов-на-Дону:

ЮжНИИгипрозем. 61 с.

Дворкин Б.А. 2011. Европейская программа GMES и перспективная группировка спутников ДЗЗ Sentinel // Геоматика. № 3 (12). С. 14-26.

Деградация земель и опустынивание в России: Новейшие подходы к анализу проблемы и поиску путей решения 2019. / Ред. *Г.С. Куст*. М.: изд-во Перо. 235 с.

Золотокрылин А.Н., Гунин П.Д., Титкова Т.Б., Бажа С.Н., Данжалова Е.В., Казанцева Т.И. 2016. Диагностика динамики опустынивания аридных пастбищ Монголии по наблюдениям на ключевых участках и MODIS-данным // Аридные экосистемы. Т. 22. № 3 (68). С. 9-19. [*Zolotokrylin A.N., Gunin P.D., Titkova T.B., Bazha S.N., Danzhalova E.V., Kazantseva T.I.* 2106. Diagnosis of the Dynamics of Desertification of Arid Pastures of Mongolia by Observation in Key Areas and Modis Data // Arid Ecosystems. Vol. 6. No. 3. P. 149-157].

Кулик К.Н., Петров В.И. 2016. История и современность «Генеральной схемы по борьбе с опустыниванием Черных земель и Кизлярских пастбищ» // Труды института геологии Дагестанского научного центра РАН. № 67. С. 94-97.

Национальная программа действий по борьбе с опустыниванием (НПДБО) в Калмыкии. 1995. Элиста: ЮжНИИгипрозем. 179 с.

Патент RU № 2265839. 2005. Способ определения состояния почвы, подверженной деградации / Ред. К.Н. Кулик, В.Г. Юферев, А.С. Рулев, К.Б. Бакурова. 2004111328/14. Заяв. 13.04.2004; опуб. 10.12.2005. Бюллетень № 34. 1 с.

Патент RU № 2327107. 2008. Способ определения состояния пастбищ, подверженных деградации / Ред. В.Г. Юферев, К.Н. Кулик, А.С. Рулев, К.Б. Бакурова. 2006112379/28. Заяв. 13.04.2006; опуб. 20.06.2008. Бюллетень № 17.

Петров В.И., Власенко М.В. 2017. Мелиоративные методы восстановления продуктивности земель Северо-Западного Прикаспия // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. № 1 (65). С. 11-16.

Салугин А.Н., Кулик К.Н. 2006. Математические модели динамики и прогноза эволюции аридных экосистем. Волгоград: ВНИАЛМИ. 180 с.

Субрегиональная национальная программа действий по борьбе с опустыниванием (НПДБО) для юго-востока европейской части Российской Федерации. 1999. Волгоград: ВНИАЛМИ. 314 с.

Ткаченко Н.А. 2014. Качественная оценка и картографирование деградации пахотных земель Волгоградского Заволжья // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. № 2 (46). С. 21-23.

Центр научных данных Sentinels (ESA-COPERNICUS). 2018 [Электронный ресурс https://scihub.copernicus.eu/dhus (дата обращения 18.12. 2018)].

Шинкаренко С.С. 2019 Пожарный режим ландшафтов Северного Прикаспия по данным очагов активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 16. № 1. С. 121-133.

Kulik K.N., Rulev A.S., Yuferev V.G. 2013. Geoinformation analysis of desertification hotspots in Astrakhan oblast // Arid Ecosystems. Vol. 19. No. 3 (56). P. 184-190. [*Кулик К.Н., Рулев А.С., Юферев В.Г.* 2013. Геоинформационный анализ очагов опустынивания на территории Астраханской области // Аридные экосистемы. Т. 19. № 3 (56). С. 91-98.]

Pernar R., Klobucar D. 2003. Estimating stand density and condition with the use of picture histograms and visual interpretation of digital orhtophotos // Annales Experimentis Silvarum Culturae Provehendis. Zagreb: Universitas Studiorum Zagrebiensis, Facultas Forestalis. P. 81-113.

Sapanov M.K., Sizemskaya M.L., Akhmedenov K.M. 2015. Reclamation stages and modern use of arid lands in the northern Caspian region // Arid Ecosystems. Vol. 5. No. 3. P. 188-193.

SRTM 90m DEM Digital Elevation Database. 2018 [Электронный ресурс https://srtm.csi.cgiar.org (дата обращения 05.12.2018)].

Zanozin V.V., Iolin M.M., Buzyakova I.V., Zanozin Vic.V. 2014. Aspects of Morphological Structure of Zonal and Intrazone Landscapes of Northern Caspian Region // European Geographical Studies. Vol. 3. No. 3. P. 126-132.