# Пространственно-временная динамика опустынивания на Чёрных землях

**С. С. Шинкаренко**

*Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, Волгоград, 400062, Россия*
*E-mail: shinkarenkos@vfanc.ru*

В работе представлены результаты картографирования очагов опустынивания на Чёрных землях с 1978 по 2018 г. Геоинформационная обработка осуществлялась в программе QGIS 3.2, основой послужили спутниковые данные Landsat и Sentinel-2. Открытые пески выделялись классификацией индексных изображений NDVI, после чего были преобразованы в векторный формат. Это позволило определить площади открытых песков, возраст очагов опустынивания на 2018 г., площади заросших и вновь образовавшихся очагов. В начале 1980-х гг. площадь опустынивания на Чёрных землях и Кизлярских пастбищах достигла 3,5 тыс. км$^2$, в регионе был объявлен режим экологического бедствия. Начиная с 1990 г. стал ощутим положительный эффект пескозакрепительных и фитомелиоративных работ, начатых во второй половине 1980-х гг. в рамках «Генеральной схемы по борьбе с опустыниванием Чёрных земель и Кизлярских пастбищ». Кроме фитомелиорации на улучшение состояния растительности и почв повлияло снижение поголовья скота, вызванное экономической ситуацией 1990-х гг., и благоприятная для вегетации флуктуация климата. В настоящее время наблюдается восстановление поголовья скота до величин середины 90-х гг. XX в., что вызывает новый цикл опустынивания Чёрных земель: на 2018 г. площадь подвижных песков превысила 600 км$^2$ (против 160 км$^2$ в 2002 г.), что соответствует площадям опустынивания 1993–1995 гг. Рост площади открытых песков связан в первую очередь не с разрастанием существующих очагов, а с образованием новых. Например, в 1995 г. было около 11,2 тыс. массивов открытых песков средней площадью 5,3 га, в 2018 г. наблюдается почти 19 тыс. очагов средней площадью 3,3 га. До 1990-х гг. 40–60 % подвижных песков были представлены очень крупными массивами площадью более 1000 га, в настоящее время преобладают очаги опустынивания до 100 га, что говорит о возможности нового «всплеска» процессов деградации в регионе. По этой причине необходим мониторинг состояния неустойчивых ландшафтов для своевременного принятия мер по их фитомелиорации и регулированию пастбищных нагрузок.

**Ключевые слова:** опустынивание, естественная растительность, деградация, Landsat, Чёрные земли, Калмыкия, Астраханская область, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 29.10.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-155-168

## Введение

Чёрные земли представляют собой обширные пространства общей площадью 35 тыс. км$^2$ на юго-востоке Республики Калмыкия (Лаганский, Чёрноземельский, Юстинский, Яшкульский р-ны) и южном правобережье Астраханской обл. (Енотаевский, Лиманский, Наримановский р-ны). На юге они граничат с Кизлярскими пастбищами, которые расположены в северной части Республики Дагестан, на востоке — с побережьем Каспийского моря, ильменно-бугровым районом и долиной Волги, на западе — с Ергенинской возвышенностью, на севере — с Сарпинской низменностью (Кулик и др., 2018). В 1950-х и начале 1960-х гг. исследуемая территория представляла собой несбитые зимние пастбища с злаково-белополынной и злаково-песчанополынной растительностью, открытые пески занимали до 2,3 % территории (Виноградов и др., 1995). В результате длительных чрезмерных антропогенных нагрузок (распашка и нерегулируемый выпас) в экстремальных климатических условиях этот регион из плоской степной равнины с устойчивым травянистым покровом превратился к 80-м гг. прошлого века в подвижное песчаное море, лишённое растительности и непригодное для сельского хозяйства. В это время суммарное поголовье овец и коз в Астраханской обл.

и Калмыкии превысило 5 млн (Кулик, Петров, 1999). Процессами опустынивания было затронуто более 80 % территории Калмыкии, из них около трети находилось в сильной и очень сильной степени деградации. С принятием в 1986 г. «Генеральной схемы по борьбе с опустыниванием Чёрных земель и Кизлярских пастбищ» (далее — «Генеральная схема...») началась работа по фитомелиорации подвижных песков кустарниками (*Kraschenninnikovia ceratoides*, *Calligonum aphyllum*, *Tamarix ramosissima* и др.) и многолетними травами, которая позволила остановить разрастание очагов опустынивания (очагов дефляции, «островов опустынивания») и закрепить их (Вдовенко, 2016; Кулик и др., 2018). В начале 1990-х гг. из-за ухудшения социально-экономической обстановки началось снижение поголовья скота, которое продолжалось до начала 2000-х гг.: в 2002 г. поголовье овец и коз Астраханской обл. и Калмыкии составило 1,3 млн (Пизенгольц, 2018). Кроме того, на Чёрных землях была создана сеть особо охраняемых природных территорий, на которых хозяйственная деятельность ограничена. На фоне роста увлажнения (Кузьмина, Трешкин, 2014; Sapanov, 2018) и в результате реализации фитомелиоративных мероприятий развеваемые пески были закреплены и практически полностью заросли. Однако в настоящее время отмечается рост поголовья скота и увеличение пастбищных нагрузок, что может повлечь усиление процессов опустынивания в регионе. В конце 2018 г. поголовье овец и коз в рассматриваемых субъектах составило уже 3,8 млн, что соответствует 1993–1994 гг. (Кулик и др., 2018). К тому же район Чёрных земель практически ежегодно подвергается воздействию пирогенного фактора, в отдельные годы выгорает более миллиона гектаров территории. Уничтожение в огне растительной ветоши приводит к усилению дефляционных процессов и увеличению риска опустынивания (Дубинин и др., 2010; Шинкаренко, 2019).

## Материалы и методы

Район Чёрных земель привлекает внимание учёных с тех пор, как здесь было объявлено экологическое бедствие. При разработке «Генеральной схемы...» исследователи опирались на материалы аэрофотосъёмки за 1954–1984 гг. и космические фотографии с пилотируемых орбитальных станций (ПОС) «Салют-6» и «Салют-7» разрешением 50–80 м за 1976, 1978 и 1982 гг. (Виноградов и др., 1995). Также для территории Астраханской обл. был выполнен анализ очагов опустынивания на основе визуальной интерпретации видимых каналов и распределения фототона зелёного канала цветовых RGB-композитных спутниковых снимков Landsat-7, IRS-5 и GeoEye с нормированием размеров пикселей до 100 м по одной стороне (Кулик и др., 2013, 2015). Определение состояния растительности и доли открытых песков в регионе на основе спектрозональных данных проводилось либо для ограниченной территории заповедника «Чёрные земли» и окрестностей по материалам Landsat (Золотокрылин и др., 2013), либо для всей территории района Чёрных земель, но по данным низкого пространственного разрешения MODIS NDVI только на 2012 г. (Золотокрылин и др., 2014).

Определение открытых песков в данной работе основывалось на классификации индексных изображений NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс), полученных по материалам спутниковой съёмки космических аппаратов (КА) Landsat-2, -3, -5, -7, -8 и Sentinel-2. В 2014–2018 гг. проводились работы по полевому эталонированию разбитых песков для контроля результатов классификаций (*рис. 1*, см. с. 157). Подобный подход широко применяется в мире для мониторинга опустынивания (Guo et al., 2017).

Выбор источников данных обусловлен свободным и удобным доступом (https://earthexplorer.usgs.gov/) и относительно высоким разрешением по сравнению, например, с информационными продуктами на базе спектрорадиометра MODIS разрешением 250 м. Пространственное разрешение изображений Landsat-2 (80 м) и Sentinel-2 (10 м) отличается от разрешения данных остальных КА (30 м). Безусловно, это сказывается на точности выделения очагов опустынивания, поэтому идентифицировались объекты площадью более трёх пикселей Landsat (более 2700 м$^2$).

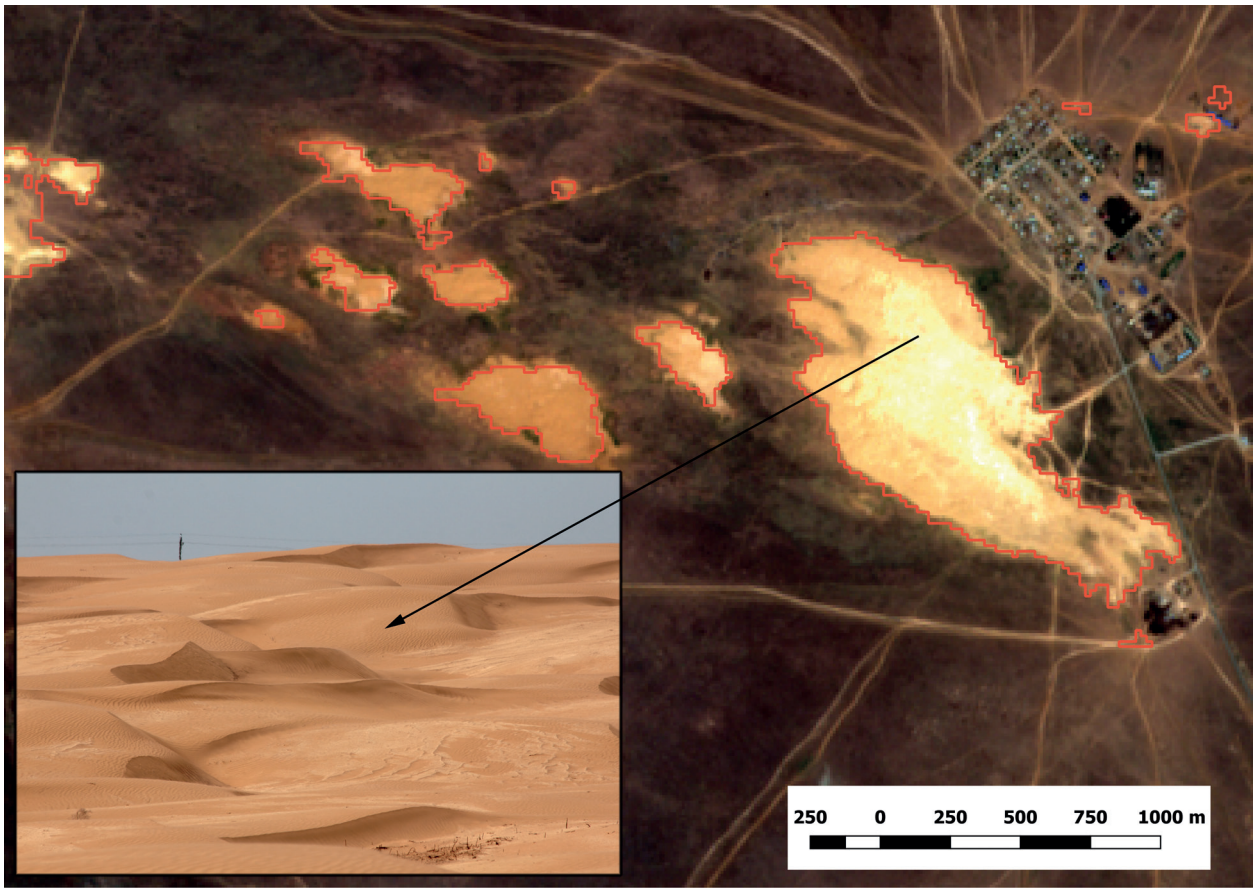


*Рис. 1.* Очаг опустынивания у пос. Привольный Яшкульского р-на Калмыкии: 46° 34′ с. ш., 45° 43′ в. д. (тайл T38TNS Sentinel-2) 30 мая 2018 г. и наземное фото на эту же дату; красный контур — результат классификации

На исследуемой территории преобладают растительные сообщества с доминированием злаков и эфемеров (*Poa bulbosa*, *Anisantha tectorum*, *Festuca valesiaca*, *Agropyron* spp., *Stipa* spp., *Alyssum turkestanicum*, *Lepidium perfoliatum*, *Androsace maxima* и др.), для которых характерна максимальная зелёная фитомасса во второй половине весны (Радочинская и др., 2019; Рулев и др., 2016), поэтому подбирались по возможности майские и апрельские снимки. Если весенние снимки были непригодны из-за облачности, использовались снимки за июнь. Даты использованных спутниковых снимков Landsat-5, -7, -8 приведены в *табл. 1*, даты изображений Sentinel-2 (тайлы T38TNR, T38TNS, T38TPR) — 27 и 30 мая 2018 г., Landsat-2 (тайлы 182–028 и 183–028) — 26 июня и 15 июля 1978 г., Landsat-3 (183–027) — 31 мая 1978 г.

*Таблица 1.* Даты использованных спутниковых снимков Landsat

| Тайл | Дата | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1986 | 1990 | 1993 | 1995 | 1998 | 2002* | 2006 | 2010 | 2013** | 2016** |
| 169–028 | 5 мая | 31 мая | 24 июня | 29 мая | 22 июня | 25 июня | 27 мая | 20 апреля | 15 июня | 23 июня |
| 170–027 | 12 июня | 25 мая | 15 июня | 18апреля | 28 мая | 15 мая | 3 июня | 14 июня | 21 мая | 14 июня |
| 170–028 | 12 июня | 25 мая | 15 июня | 18апреля | 13 июня | 15 мая | 3 июня | 14 июня | 21 мая | 14 июня |

* — Landsat-7 ETM+; ** — Landsat-8 OLI; остальное — Landsat-5 TM.

Атмосферная коррекция данных выполнялась с помощью модуля GRASS GIS i.atmcorr, радиометрическая калибровка производилась в калькуляторе растров QGIS согласно метаданным Landsat. Поскольку использовались изображения с разных витков КА с разницей

1–3 нед, то при классификации по NDVI сказывались отличия в фенофазах растительных сообществ. По этой причине каждое изображение классифицировалось отдельно, после чего данные объединялись в результирующий растр и преобразовывались в векторный формат. Далее рассчитывались площади получившихся полигонов (очаги опустынивания распределены на размерные классы, предложенные для Астраханской обл. в работе (Кулик и др., 2013)), также выполнялись оверлейные операции: пересечение слоем с границами муниципальных образований, пересечение и разность слоёв с очагами опустынивания за разные годы.

Попарная разность полигональных слоёв очагов опустынивания за различные временные промежутки даёт величину прироста и уменьшения площадей открытых песков за рассматриваемые периоды (*рис. 2*). Например, вычитая поочерёдно из слоёв 1986 г. слои 1978 г., затем из слоёв 1990 г. слои 1986 г. и т. д. получаем площади опустынивания, которых не было в предыдущий период. А вычитание из слоёв 1978 г. слоёв 1986 г. и т. д. даёт площади заросших за соответствующий период открытых песков. Таким образом, динамика площади опустынивания состоит из разнонаправленных процессов: образования новых очагов, зарастания старых и повторного опустынивания уже восстановившихся.

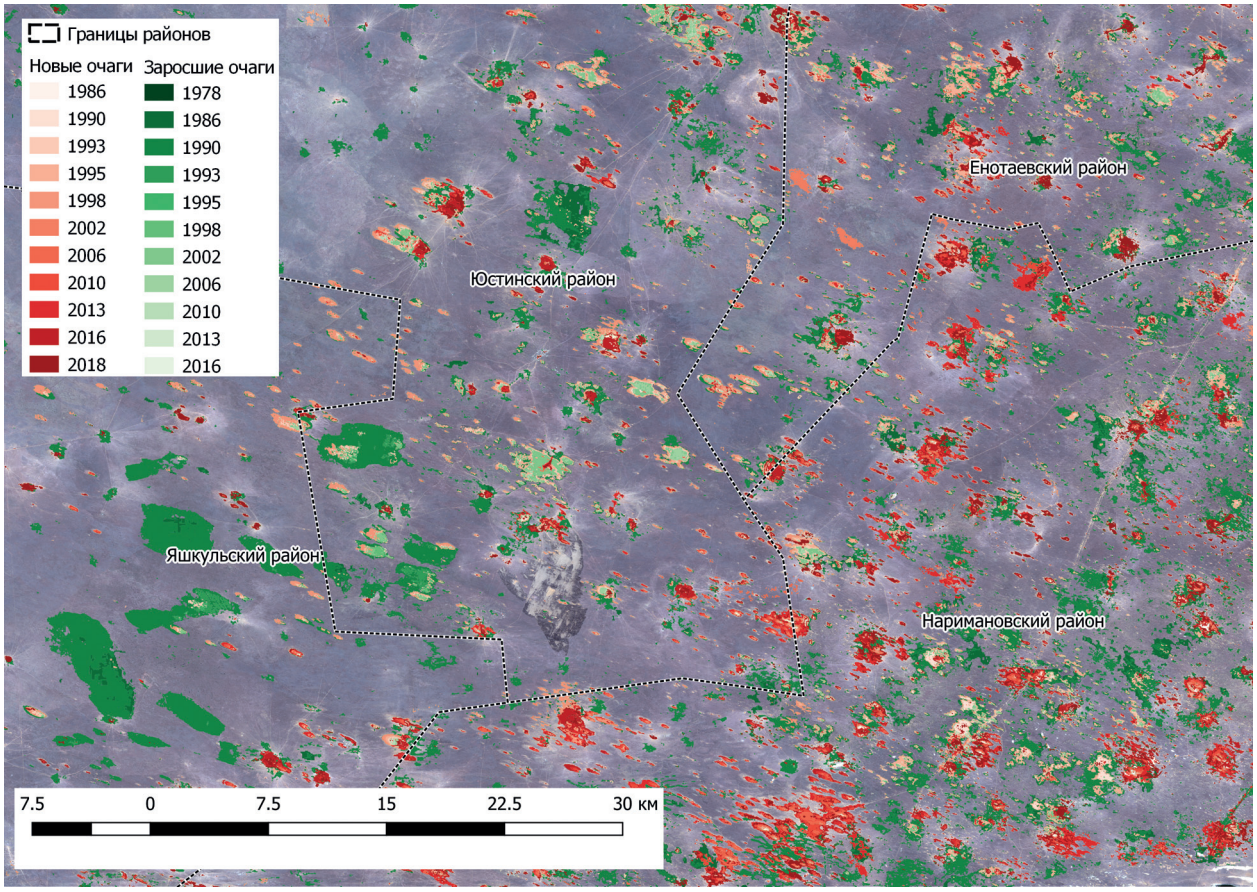


*Рис. 2.* Пример выполнения попарных оверлейных операций пересечения и разности слоёв с очагами опустынивания разных лет; подложка — снимок Sentinel-2 от 27 мая 2018 г.

Пересечение слоёв позволяет определить очаги, существующие весь период, с пространственной локализацией (*рис. 3*, см. с. 159). Например, пересечением слоёв с очагами опустынивания 1986 и 2018 гг. получаются площади опустынивания 1986 г., существующие в 2018 г.; вычитанием слоя 2018 г. из слоя 1986 г. получаются площади опустынивания 1986 г., заросшие в 2018 г., а вычитанием слоёв 1986 г. из слоёв 2018 г. — площади опустынивания 2018 г., которые отсутствовали в 1986 г. Это очень важно для определения вновь возникающих, увеличивающихся и зарастающих массивов открытых песков.

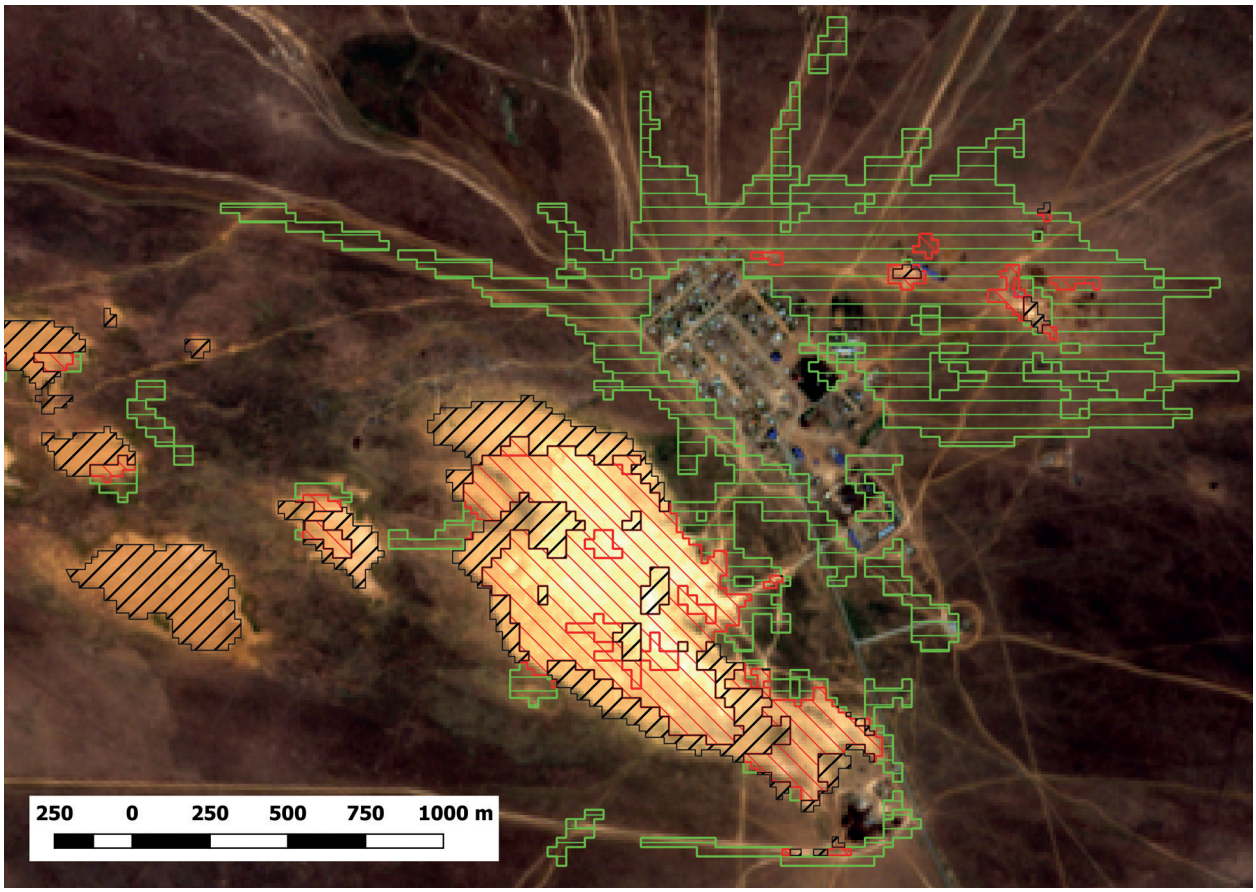


*Рис. 3.* Пример выполнения оверлейных операций со слоями опустынивания на 1986 и 2018 гг. у пос. Привольный Яшкульского р-на Калмыкии. Зелёный цвет — площадь опустынивания 1986 г., восстановленная к 2018 г.; красный — площадь опустынивания 1986 г., существующая в 2018 г.; чёрный — новые площади опустынивания 2018 г., которых не было в 1986 г.

Геоинформационная обработка осуществлялась в программе QGIS версий 2.18 и 3.2. Площади полигонов рассчитаны на эллипсоиде WGS 84. В качестве базовой основы для карт использованы скорректированные автором слои водных объектов и административных границ проекта Open street maps, распространяемые по лицензии Open Data Commons Open Database License (ODbL). Картографические материалы представлены в проекции UTM (Universal Transverse Mercator, зона 38). Сведения о поголовье взяты в Базе данных муниципальных образований (http://www.gks.ru/dbscripts/munst/), метеоданные — в Автоматизированной информационной системе обработки режимной информации (АИСОРИ) Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) Росгидромета (http://aisori.meteo.ru/ClimateR). Статистическая обработка данных выполнена в программе MS Office Excel.

## Результаты и обсуждение

В результате классификации индексных изображений NDVI за исследуемый период определены площади открытых песков в районе Чёрных земель (*рис. 4*, см. с. 160, *табл. 2*). Максимальная площадь опустынивания отмечена в 1986 г., всего идентифицировано более 47 тыс. массивов разбитых песков, площадь которых составила 307,6 тыс. га. При этом 41 % всей площади песков в 1978 и 1986 гг. был представлен двумя десятками очень крупных очагов площадью более 1000 га. После 1986 г. благодаря фитомелиоративным мероприятиям количество очень крупных очагов начало снижаться и к концу XX в. практически сошло на нет,

только в отдельные годы (2002 и 2018) было по одному очень крупному песчаному массиву. В 1978 г. преобладали очаги опустынивания площадью 1–10 га, на их долю приходилось 56 % количества и 7 % площади. После 1986 г. по настоящее время в количественном отношении лидируют песчаные массивы размером до 1 га (от 52 до 67 %), занимающие площадь в разные годы от 2 до 11 % всех опустыненных земель. После 1990 г. наибольший вклад в площадь открытых песков вносят очаги размером 10–100 га, составляющие от 5 до 7 % всего количества.

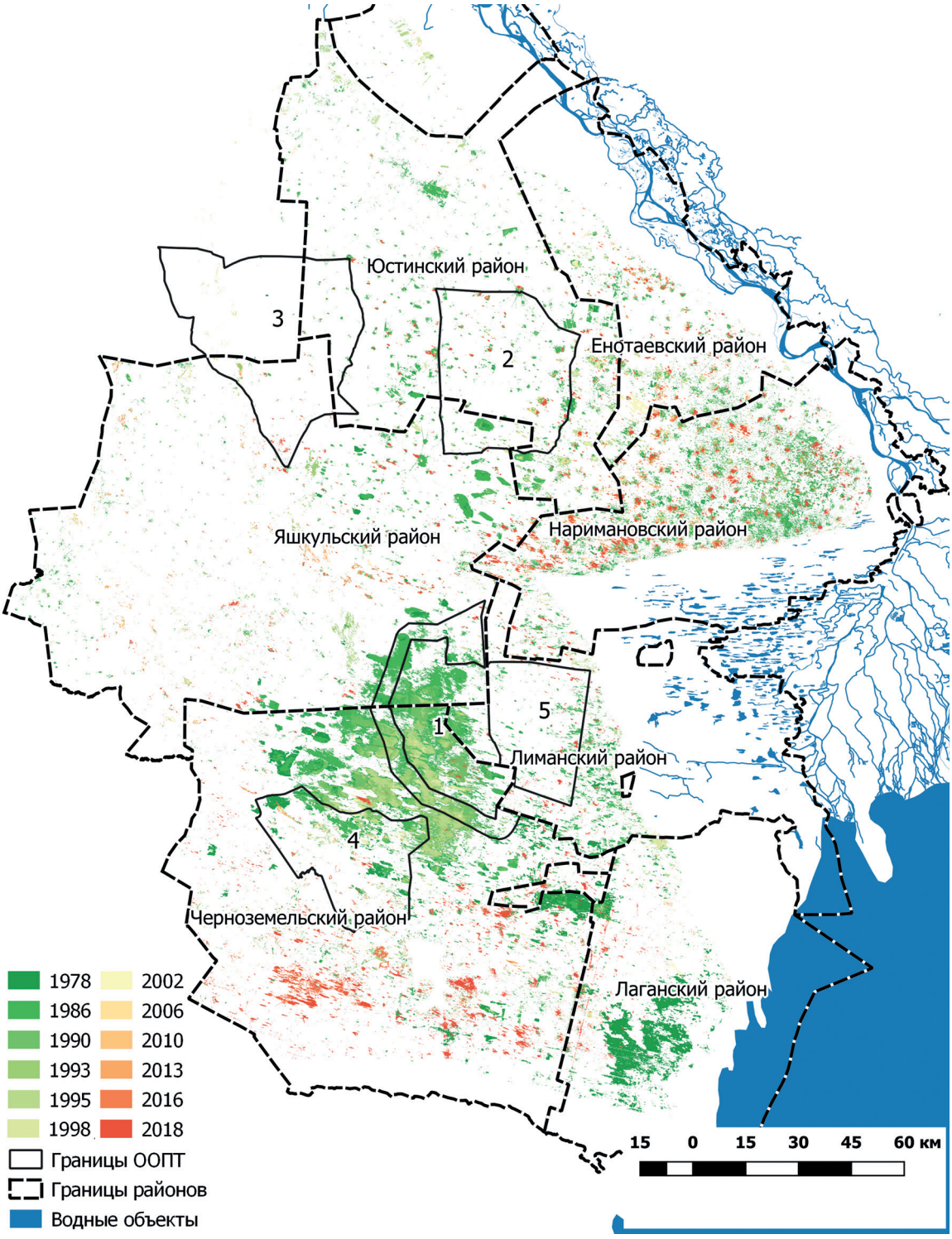


*Рис. 4.* Пространственно-временное распределение очагов опустынивания. 1 — заповедник «Чёрные земли» с буферной зоной; 2 — заказник «Харбинский»; 3 — заказник «Сарпинский»; 4 — заказник «Меклетинский»; 5 — заказник «Степной»

Наибольшая площадь заросших очагов дефляции расположена на особо охраняемых природных территориях: в заповеднике «Чёрные земли», федеральных и региональных заказниках, а также в Лаганском р-не. Вновь образованные массивы разбитых песков находятся в Наримановском р-не Астраханской обл. на границе с Калмыкией и в южной части Чёрноземельского района Калмыкии.

*Таблица 2.* Площади очагов опустынивания разных размерных классов

| Год | Количество/площадь (тыс. га) очагов опустынивания разных размерных классов | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Размерные классы, га | | | | | Всего |
| | 0–1 | 1–10 | 10–100 | 100–1000 | >1000 | |
| 1978 | 2098/1,46 | 4554/13,59 | 1168/34,67 | 250/63,75 | 21/90,38 | 8091/203,85 |
| 1986 | 31754/14,7 | 12989/36,29 | 2096/58,47 | 297/71,63 | 20/126,45 | 47156/307,55 |
| 1990 | 4980/2,3 | 2481/7,12 | 413/10,52 | 44/12,18 | 9/60,5 | 7927/92,61 |
| 1993 | 4825/2,28 | 2846/8,77 | 488/12,23 | 51/14,07 | 7/25,61 | 8217/62,95 |
| 1995 | 6768/3,17 | 3669/11,02 | 724/18,93 | 72/15,11 | 5/11,92 | 11238/60,15 |
| 1998 | 3863/2,11 | 2928/8,58 | 553/14,57 | 38/8,12 | 0/0 | 7382/33,39 |
| 2002 | 3070/1,43 | 1645/4,74 | 271/7,05 | 11/1,69 | 1/1,13 | 4998/16,04 |
| 2006 | 3104/1,47 | 1901/5,74 | 278/6,63 | 4/0,5 | 0/0 | 5287/14,34 |
| 2010 | 3131/1,47 | 1815/5,57 | 273/6,84 | 6/1,04 | 0/0 | 5225/14,91 |
| 2013 | 4268/2,01 | 2547/7,76 | 454/11,62 | 36/6,6 | 0/0 | 7305/27,99 |
| 2016 | 4497/1,92 | 1848/5,59 | 351/9,39 | 27/7,9 | 0/0 | 6723/24,8 |
| 2018 | 12575/5,29 | 5189/15,18 | 933/25,56 | 83/14,19 | 1/1,44 | 18781/61,65 |

*Таблица 3.* Площади и количество очагов опустынивания в муниципальных районах региона исследований

| Район | Площадь опустынивания (тыс. га)/количество очагов опустынивания (тыс.) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Год | | | | | |
| | 1978 | 1986 | 1990 | 1993 | 1995 | 1998 |
| Енотаевский | 4,5/0,4 | 16,2/4,8 | 1,7/0,6 | 2,7/0,7 | 5,2/1 | 5,3/1 |
| Лиманский | 8,1/0,4 | 19,5/3,2 | 2,4/0,6 | 0,8/0,2 | 1,9/0,7 | 0,8/0,4 |
| Наримановский | 25,5/2,1 | 60,1/16,2 | 5/1,7 | 5,4/1,9 | 10/2,8 | 9,5/2,8 |
| Лаганский | 34,4/1,2 | 2,7/0,7 | 0,2/0,1 | 0,3/0,2 | 1,4/0,5 | 1,5/0,3 |
| Чёрноземельский | 94,2/3 | 118,8/8,5 | 75/3 | 43,7/3 | 30,3/3,9 | 7/1,1 |
| Юстинский | 9,5/0,6 | 35,1/7,9 | 3,3/0,7 | 3,7/0,6 | 7/1,3 | 6,3/0,9 |
| Яшкульский | 22,7/0,7 | 57,7/6,7 | 5,5/1,2 | 3,1/1 | 4,9/1,2 | 2,9/0,8 |
| | 2002 | 2006 | 2010 | 2013 | 2016 | 2018 |
| Енотаевский | 2,3/0,4 | 1,4/0,5 | 1,3/0,5 | 4,3/0,9 | 1,3/0,5 | 3,6/1,2 |
| Лиманский | 0,2/0,1 | 0,2/0,1 | 0,2/0,1 | 0,2/0,1 | 0,3/0,1 | 3,4/0,8 |
| Наримановский | 3,9/1,2 | 5,4/1,6 | 7,7/2 | 14,9/2,9 | 7,8/1,9 | 17,7/5,1 |
| Лаганский | 0,6/0,3 | 0,3/0,2 | 0,4/0,3 | 0,4/0,3 | 0,4/0,4 | 2,8/1,3 |
| Чёрноземельский | 4,4/2 | 2,8/1,4 | 2,6/1,2 | 1,8/0,9 | 11,1/2,4 | 25,2/6,8 |
| Юстинский | 1,6/0,4 | 1,8/0,6 | 1,3/0,4 | 3,5/0,8 | 1,9/0,5 | 4,2/1,2 |
| Яшкульский | 3/0,6 | 2,7/1,0 | 1,7/0,8 | 3,2/1,5 | 2,3/1,1 | 6,5/2,4 |

В 1978–1995 гг. большая доля опустынивания приходилась на Чёрноземельский р-он Калмыкии (*табл. 3*): от 47 % в 1978 г. до 80 % в 1990 г. В 1998–2013 гг. наибольшая площадь очагов дефляции была в Наримановском р-не (от 28 до 52 %), а в 2016–2018 гг. — снова в Чёрноземельском. По количеству очагов опустынивания также лидируют Чёрноземельский и Наримановский р-ны: во все годы на них приходилось 50–65 % всех открытых песчаных массивов, от 25 до 40 % в каждом. Кроме того, относительно большие площади опустынивания расположены в Яшкульском и Юстинском р-нах Калмыкии. Наименьшая доля разбитых песков в регионе в настоящее время у Лаганского р-на: на прилегающую к Чёрноземельскому часть района приходится всего 4,4 % всей площади опустынивания. Самое малое количество очагов дефляции сейчас в Лиманском (4,1 %), Енотаевском (6,5 %) и Юстинском (6,2 %) р-нах.

Средняя площадь массивов открытых песков снижалась с 25,2 га в 1978 г. до 2,7 га в 2006 г., затем увеличилась до 3,7 га в 2016 г. На 2018 г. средняя площадь составила 3,3 га. Наиболее крупные очаги опустынивания в 1978 г. располагались в Лаганском (средняя площадь — 30 га), Чёрноземельском (31,6 га) и Яшкульском (34,3 га) р-нах. К 1986 г. резко возросло количество открытых песков за счёт образования новых «островов опустынивания» средней площадью 6,5 га. К 2002–2010 гг., когда площадь опустынивания была наименьшей, средняя площадь массивов песков составляла 2,7–3,2 га. При этом наиболее крупные наблюдались в Енотаевском (средняя площадь — 3–6 га), Наримановском (3–5 га) р-нах Астраханской обл. и Юстинском р-не Калмыкии (3–4,5 га). В 2018 г. наибольшая средняя площадь очагов опустынивания зафиксирована в Лиманском р-не — 4,4 га.

*Рис. 5.* Динамика опустынивания Чёрных земель и поголовья овец и коз в Астраханской обл. и Калмыкии в 1986–2018 гг.

Оверлейными операциями пересечения и разности получены общие площади опустынивания, прирост опустынивания и площади восстановления между отдельными рассматриваемыми периодами (*рис. 5*). К 1986 г. по сравнению с 1978 г. площадь опустынивания увеличилась примерно на 100 тыс. га. Это произошло за счёт увеличения площади, занятой открытыми песками, на 212 тыс. га и восстановления очагов дефляции на площади 107 тыс. га. Ещё примерно 96 тыс. га массивов разбитых песков 1978 г. сохранились в 1986 г. Разница между приростом опустынивания и восстановления и обеспечила увеличение площади очагов дефляции. К началу 2000-х гг. темпы восстановления растительности превысили темпы образования новых «островов опустынивания» с учётом уже существующих, поэтому к 2006 г. площадь разбитых песков была минимальной. Причиной этому послужили климатические изменения (Кузьмина, Трешкин, 2014) и снижение поголовья скота в силу социально-экономических причин (Кулик и др., 2018; Пизенгольц, 2018). В 2002 г. поголовье овец и коз в Астраханской обл. и Калмыкии достигло минимальных значений, едва превысив миллион. В то же время 2002 г. был влажным (сумма осадков за календарный год составила 340 мм, за

гидрологический год — 364 мм при средних значениях за 1978–2018 гг. — 274 мм), благодаря чему значительная часть открытых песков в этот год покрылась растительностью. Важную роль в зарастании открытых песков играют осадки за холодное полугодие и в весенний период. Даже при близких к норме годовых суммах осадков возможна деградация растительности, если в весенний период осадков было недостаточно. Как, например, в 2010–2013 гг. (*рис. 6*), когда темпы роста новых площадей опустынивания превысили скорость зарастания существующих. Рассматриваемый период делится на три отрезка: 1986–2006 гг. — зарастание очагов опустынивания, образованных в 1970–1980-х гг.; 2006–2016 гг. — период неустойчивого балансирования; 2017–2018 гг. — рост площади опустынивания.

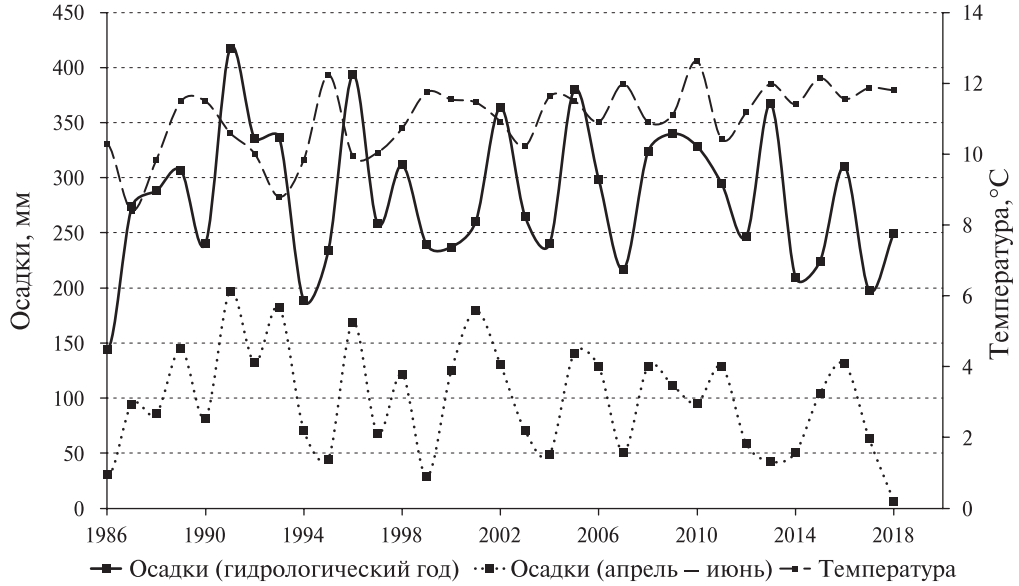


*Рис. 6.* Динамика суммы осадков за гидрологический год и апрель – май, а также среднегодовой температуры по метеостанции Яшкуль в 1986–2018 гг.

Корреляционный анализ данных за 1986–2006 гг. показал наличие сильной обратной связи между приростами опустынивания и годовыми суммами осадков ($r = -0{,}72$), а также значимой связи между площадью общих за временные срезы очагов опустынивания и поголовьем овец и коз ($r = 0{,}92$). Таким образом, можно утверждать, что восстановление опустыненных земель в 1986–2006 гг. происходило за счёт роста увлажнения и снижения пастбищных нагрузок на фоне проведённых мероприятий по фитомелиорации в рамках «Генеральной схемы...» в конце 1980-х гг. В 2006–2018 гг. отмечена сильная значимая связь между площадью очагов опустынивания и среднегодовой температурой ($r = 0{,}87$), сильная обратная связь прироста опустынивания с суммами осадков за апрель – июнь ($r = -0{,}90$) и гидрологический год ($r = -0{,}88$), а также прямая связь с поголовьем овец и коз ($r = 0{,}80$). В то же время есть заметная обратная связь между скоростью зарастания и максимальными среднемесячными температурами ($r = -0{,}46$), с другими показателями статистически значимой корреляции нет. Рост площадей открытых песков в 2013–2018 гг. обеспечен увеличением поголовья скота на фоне уменьшения увлажнения, в первую очередь в весенний период, и повышения среднегодовой температуры. Увеличение пастбищных нагрузок способствует возникновению новых очагов опустынивания у животноводческих ферм и поилок, кроме того препятствует самозарастанию существующих массивов разбитых песков. Также восстановление растительности в 2000–2010 гг. способствовало накоплению мортмассы и активизации степных пожаров (Дубинин и др., 2010; Шинкаренко, 2019), которые приводили к усилению дефляционных процессов в результате уничтожения растительной ветоши, кустарников и полукустарничков, закреплявших пески.

С 1978 по 1986 г. восстановление очагов опустынивания произошло только в Лаганском р-не. После 1986 к 1990 г. во всех муниципальных районах Чёрных земель происходило зарастание песков, особенно масштабное — в Чёрноземельском р-не в связи с фитомелиорацией: с 1978 по 1998 г. здесь закреплялось от 18 до 60 тыс. га открытых песков в год, при том что новых очагов возникало не более 3–5 тыс. га. В 1995 г. во всех районах, кроме Чёрноземельского, немного выросла площадь очагов опустынивания из-за недостаточного увлажнения в 1994–1995 гг. (см. *рис. 6*). В 2002–2006 гг. прирост опустынивания опережал темпы зарастания песков только в Наримановском р-не на величину 1,5–7,2 тыс. га. К 2018 г. во всех муниципальных районах Чёрных земель скорость опустынивания превысила скорость зарастания песков. Увеличение площади за 2016–2018 гг. составило от 2,2 тыс. га в Енотаевском и Юстинском р-нах и до 13,5 тыс. га в Чёрноземельском р-не. Таким образом, за последние три года опустыненные земли увеличились почти на 37 тыс. га: площадь новых по сравнению с 2016 г. очагов опустынивания составила 45,1 тыс. га, в то же время заросло 8,3 тыс. га песчаных массивов 2016 г.

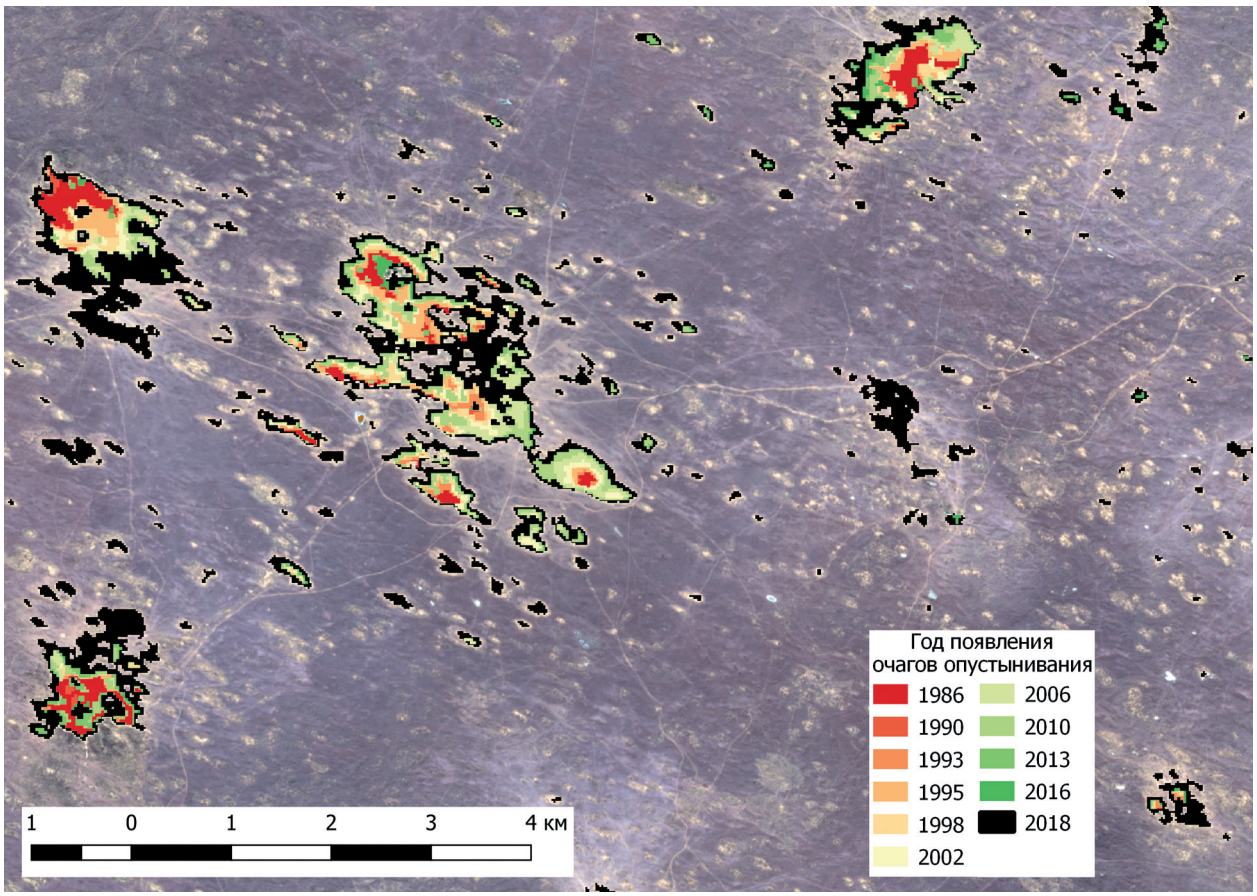


*Рис. 7.* Год появления очагов опустынивания, существующих в 2018 г.
Наримановский р-н, 46° 39′ с. ш., 47° 24′ в. д., подложка — Sentinel-2 от 27.05.2018

Пересечение слоя 2018 г. с каждым из более ранних позволило получить площадь опустынивания, которая просуществовала с предыдущих периодов по настоящее время (*рис. 7*, см. с. 164). Например, из почти 60 тыс. га разбитых песков 2018 г. в 2016 г. было 10,7 тыс. га, в 2013 г. — 14,1 тыс. га, а в 1986 г. — 16,5 тыс. га. Общая площадь открытых песков 1986 г., которые за рассматриваемый период до 2018 г. никогда не зарастали, составляет примерно 360 га. Эти очаги расположены большей частью в Наримановском р-не. Здесь же находится более половины площадей очагов опустынивания, просуществовавших по настоящее время с 1990 г. (294 га из 397), 1993 г. (388 га из 531) и 1995 г. (590 га из 802). На этих участках

необходимо проведение работ по закреплению песков, иначе может начаться новый этап необратимых процессов опустынивания. Разработанные тематические геоинформационные слои могут стать основой для принятия решений о фитомелиорации тех или иных территорий Чёрных земель.

## Выводы

В ходе исследований впервые проведён анализ ретроспективных спектрозональных спутниковых данных среднего и высокого пространственного разрешения Чёрных земель за период 1978–2018 гг. На основе классификации индексных изображений NDVI с контролем по полевым эталонам выделены очаги опустынивания, представляющие собой массивы открытых подвижных песков. Наибольшая площадь опустынивания отмечена в середине 80-х гг. прошлого века — более 3 тыс. км$^2$.

Благодаря реализации «Генеральной схемы...», пусть и не в полном объёме, на фоне увеличения увлажнения и снижения поголовья скота в регионе к 2006–2010 гг. площадь опустынивания сократилась до 140–150 км$^2$. В 80-х гг. XX в. площадь опустынивания обеспечивалась относительно небольшим количеством очень крупных песчаных массивов в Чёрноземельском и Яшкульском р-нах, после 1990 г. наибольший вклад в опустынивание вносили очаги площадью от 10 до 100 га. В количественном отношении преобладают очаги до 1 га. В 2000–2018 гг. практически полностью отсутствуют очаги дефляции более 1000 га, фитомелиорация которых была бы затруднена из-за значительной площади. В то же время к настоящему моменту появилось множество новых очагов опустынивания на территориях, которые ранее не были подвержены деградации, что говорит о возможности возобновления роста площади открытых песков. Корреляционный анализ показал сильную связь между снижением площади опустынивания, динамикой поголовья и годовых сумм осадков в 1986–2006 гг. Это подтверждает, что кроме проведённых фитомелиоративных мероприятий по закреплению песков кустарниками и многолетними травами существенную роль в восстановлении растительности на Чёрных землях играли климатические изменения и снижение пастбищных нагрузок из-за ухудшения социально-экономических условий 1990-х гг. Рост опустынивания начался после 2010 г. в силу увеличения пастбищных нагрузок на фоне уменьшения суммы осадков за весенний период, очень важный для вегетации злаковых трав, доминирующих в растительных сообществах. За период восстановления растительности в 2000–2010 гг. из-за накопления растительной ветоши в регионе участились ландшафтные пожары, приведшие к гибели кустарников и полукустарничков, закреплявших пески. На 2018 г. площадь опустынивания превысила 600 км$^2$. На Чёрных землях требуется мониторинг процессов опустынивания для своевременного регулирования пастбищных нагрузок и при необходимости принятия мер по закреплению песчаных массивов, имеющих тенденцию к росту.

Работа выполнена по теме государственного задания Федерального научного центра агроэкологии Российской академии наук, регистр. № АААА-А16-116122010038-9.

## Литература

1. *Вдовенко А. В.* Восстановление нарушенных экосистем Черноземельских и Кизлярских пастбищ // Научно-агроном. журн. 2016. № 1. С. 25–29.
2. *Виноградов В. Н.*, *Капцов А. Н.*, *Кулик К. Н.* Прогнозирование динамики разбитых песков Черных земель Калмыкии по обучающей последовательности аэрокосмических снимков // Аридные экосистемы. 1995. Т. 1. № 1. С 62–77.
3. *Дубинин М. Ю.*, *Лущекина А. А.*, *Раделоф Ф. К.* Оценка современной динамики пожаров в аридных экосистемах по материалам космической съемки (на примере Черных земель) // Аридные экосистемы. 2010. Т. 6. № 3. С 5–16.

4. *Золотокрылин А. Н.*, *Титкова Т. Б.*, *Уланова С. С.*, *Федорова Н. Л.* Наземные и спутниковые исследования продуктивности пастбищ республики Калмыкии с различной степенью деградации растительных сообществ // Аридные экосистемы. 2013. Т. 19. № 4(57). С. 31–39.
5. *Золотокрылин А. Н.*, *Трофимова И. А.*, *Титкова Т. Б.* Оценка экологического состояния «норма» аридных пастбищ по геоботаническим и MODIS данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 197–207.
6. *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.
7. *Кулик К. Н.*, *Петров В. И.* Древние очаги дефляции на Черных землях и возможности их фитомелиорации // Аридные экосистемы. 1999. Т. 5. № 10. С. 57–65.
8. *Кулик К. Н.*, *Рулев А. С.*, *Юферев В. Г.* Геоинформационный анализ очагов опустынивания на территории Астраханской области // Аридные экосистемы. 2013. Т. 19. № 4. С. 91–98.
9. *Кулик К. Н.*, *Рулев А. С.*, *Юферев В. Г.* Геоинформационный анализ динамики опустынивания на территории Астраханской области // Аридные экосистемы. 2015. Т. 21. № 3. С. 23–32.
10. *Кулик К. Н.*, *Петров В. И.*, *Рулев А. С.*, *Кошелева О. Ю.*, *Шинкаренко С. С.* К 30-летию «Генеральной схемы по борьбе с опустыниванием Черных земель и Кизлярских пастбищ» // Аридные экосистемы. 2018. № 1. С. 5–12.
11. *Пизенгольц В. М.* Развитие отечественного животноводства в России // Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса. 2018. № 1. С. 55–60.
12. *Радочинская Л. П.*, *Кладиев А. К.*, *Рыбашлыкова Л. П.* Продукционный потенциал восстановленных пастбищ северо-западного Прикаспия // Аридные экосистемы. 2019. Т. 25. № 1. С. 61–68.
13. *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.
14. *Шинкаренко С. С.* Пожарный режим ландшафтов Северного Прикаспия по данным очагов активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 121–133.
15. *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. No. 6. P. 255.
16. *Sapanov M. K.* Environmental Implications of Climate Warming for the Northern Caspian Region // Arid Ecosystems. 2018. V. 8. No. 1. P. 13–21.

## Spatial-temporal dynamics of desertification in Black Lands

**S. S. Shinkarenko**

*Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Meliorations and Agroforestry RAS, Volgograd 400062, Russia*
*E-mail: shinkarenkos@vfanc.ru*

The results of mapping the desertification points in the Black Lands from 1978 to 2018 are described in this paper. Geoinformation processing was carried out in the QGIS 3.2 program based on satellite data from Landsat and Sentinel-2. Open sands were marked by the NDVI index images classification, and then they were converted into a vector format. This made it possible to determine the areas of open sands, the age of desertification points in 2018, and the areas of overgrown and newly formed points. In the early 1980s, the desertification area in the Black Lands and Kizlyar pastures reached 3.5 thousand km$^2$. An environmental disaster regime was declared in the region. Since 1990, the positive effect of sand-fixing and phyto-reclamation works begun in the second half of the 1980s as part of the General Plan to Combat Desertification of the Black Lands and Kizlyar Pastures has become relevant. In addition to phytomelioration, an improvement in the state of vegetation and soils was affected by a decrease in the number of livestock due to the economic situation in the 1990s and climate fluctuation favorable for vegetation. Currently, cattle stock is being restored to the values of the mid 90s of the XX century. And it causes a new desertification cycle of the Black Lands: in 2018, the area of mobile sand exceeded 600 km$^2$ (against 160 km$^2$ in 2002), which corresponds to the desertification areas of 1993–1995. The increase in the area of open sands is associated not with the expansion of existing

points, but with the formation of new ones. For example, in 1995 there were about 11.2 thousand open sand masses with an average area of 5.3 hectares, in 2018 there were almost 19 thousand points with an average area of 3.3 hectares. Until the 1990s, 40–60 % of mobile sands were represented by very large massifs with an area of more than 1000 hectares, now desertification points up to 100 hectares predominate, and it means the possibility of a new "surge" in degradation processes in the region. For this reason, it is necessary to monitor the state of unstable landscapes for timely adoption of measures for their phytomelioration and regulation of pasture loads.

**Keywords:** desertification, natural vegetation, degradation, Landsat, Black Lands, Kalmykia, Astrakhan region, remote sensing

Accepted: 29.10.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-155-168

## References

1. Vdovenko A. V., Vosstanovlenie narushennykh ekosistem Chernozemel'skikh i Kizlyarskikh pastbishch (Restoration of disturbed ecosystems of the Chernozemel'sk and Kizlyar pastures), *Nauchno-agronomicheskii zhurnal*, 2016, No. 1, pp. 25–29.
2. Vinogradov V. N., Kaptsov A. N., Kulik K. N., Prognozirovanie dinamiki razbitykh peskov Chernykh zemel' Kalmykii po obuchayushchei posledovatel'nosti aerokosmicheskikh snimkov (Prediction of the dynamics of the broken sands of the Black Lands of Kalmykia using the training sequence of aerospace images), *Aridnye ekosistemy*, 1995, Vol. 1, No. 1, pp. 62–77.
3. Dubinin M. Yu., Lushchekina A. A., Radelof F. K., Otsenka sovremennoi dinamiki pozharov v aridnykh ekosistemakh po materialam kosmicheskoi s″emki (na primere Chernykh zemel') (Assessment of modern burning dynamics in arid ecosystems using remote sensing data (case study of Chernye zemli)), *Aridnye ekosistemy*, 2010, Vol. 6, No. 3, pp. 5–16.
4. Zolotokrylin A. N., Titkova T. B., Ulanova S. S., Fedorova N. L., Nazemnye i sputnikovye issledovaniya produktivnosti pastbishch respubliki Kalmykii s razlichnoi stepen'yu degradatsii rastitel'nykh soobshchestv (Terrestrial and satellite investigation of pasture productivity of Kalmykia with different degree of vegetation degradation), *Aridnye ekosistemy*, 2013, Vol. 19, No. 4(57), pp. 31–39.
5. Zolotokrylin A. N., Trofimova I. A., Titkova T. B., Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya "norma" aridnykh pastbishch po geobotanicheskim i MODIS dannym (Ecological conditions estimation: "normal" arid pastures by MODIS and geobotanical data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 197–207.
6. Kuzmina Zh. V., Treshkin S. E., Klimaticheskie izmeneniya v basseine Nizhnei Volgi i ikh vliyanie na sostoyanie ekosistem (Climate changes in the basin of the Lower Volga and their influence on the ecosystem), *Aridnye ekosistemy*, 2014, Vol. 20, No. 3(60), pp. 14–32.
7. Kulik K. N., Petrov V. I., Drevnie ochagi deflyatsii na Chernykh zemlyakh i vozmozhnosti ikh fitomelioratsii (Ancient deflation hotspots in the Black Lands and the possibility of their phytomelioration), *Aridnye ekosistemy*, 1999, Vol. 5, No. 10, pp. 57–65.
8. Kulik K. N., Rulev A. S., Yuferev V. G., Geoinformatsionnyi analiz ochagov opustynivaniya na territorii Astrakhanskoi oblasti (Geoinformation analysis of desertification hotspots in the Astrakhan region), *Aridnye ekosistemy*, 2013, Vol. 19, No. 4, pp. 91–98.
9. Kulik K. N., Rulev A. S., Yuferev V. G., Geoinformatsionnyi analiz dinamiki opustynivaniya na territorii Astrakhanskoi oblasti (GIS-based analysis of the dinamics of desertification in the Astrakhan region), *Aridnye ekosistemy*, 2015, Vol. 21, No. 3, pp. 23–32.
10. Kulik K. N., Petrov V. I., Rulev A. S., Kosheleva O. Yu., Shinkarenko S. S., K 30-letiyu "General'noi skhemy po bor'be s opustynivaniem Chernykh zemel' i Kizlyarskikh pastbishch" (On the 30th Anniversary of the "General Plan to Combat Desertification of Black Lands and Kizlyar Pastures"), *Aridnye ekosistemy*, 2018, No. 1, pp. 5–12.
11. Pizengolts V. M., Razvitie otechestvennogo zhivotnovodstva v Rossii (Development of livestock in Russia), *Teoreticheskie i prikladnye problemy agropromyshlennogo kompleksa*, 2018, No. 1, pp. 55–60.
12. Radochinskaya L. P., Kladiev A. K., Rybashlykova L. P., Produktsionnyi potentsial vosstanovlennykh pastbishch severo-zapadnogo Prikaspiya (Production potential of pastures restored the North-Western Caspian), *Aridnye ekosistemy*, 2019, Vol. 25, No. 1, pp. 61–68.
13. Rulev A. S., Kanishchev S. N., Shinkarenko S. S., Analiz sezonnoi dinamiki NDVI estestvennoi rastitel'nosti Zavolzh'ya Volgogradskoi oblasti (Analysis of NDVI seasonal dynamics of natural vegetation of Low Trans-Volga in Volgograd region), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 113–123.

14. Shinkarenko S. S., Pozharnyi rezhim landshaftov Severnogo Prikaspiya po dannym ochagov aktivnogo goreniya (Fire regime of North Caspian landscapes according to the data of active burning centres), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 121–133.
15. 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, Vol. 9, No. 6, p. 255.
16. Sapanov M. K., Environmental Implications of Climate Warming for the Northern Caspian Region, *Arid Ecosystems*, 2018, Vol. 8, No. 1, pp. 13–21.