

**ОЦЕНКА ДИНАМИКИ НАЗЕМНОГО ПОКРОВА В ЦЕЛЯХ УСТАНОВЛЕНИЯ
НЕЙТРАЛЬНОГО БАЛАНСА ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ НА ЛОКАЛЬНОМ УРОВНЕ
(ДЛЯ ОПУСТЫНЕННЫХ УГОДИЙ СУХОСТЕПНОГО ЗАВОЛЖЬЯ)**

© 2023 г. В.Д. Славко, О.В.Андреева, Г.С. Куст

*Институт географии Российской академии наук
Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 29. E-mail: kust@igras.ru*

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

Сухостепное Заволжье имеет сложную структуру земель, представленную участками орошаемого и богарного земледелия, пастбищными угодьями как на естественных степных участках, так и на заброшенных пахотных землях, что приводит к существенному искажению результатов оценки нейтрального баланса деградации земель (НБДЗ) на основе стандартных подходов, разработанных для анализа состояния земель на глобальном и региональном уровне. В работе анализируется проблема интерпретации результатов оценки динамики наземного покрова как одного из основных глобальных индикаторов НБДЗ, предлагаемых Конвенцией ООН по борьбе с опустыниванием. Для исследуемой территории был разработан и применен метод, основанный на анализе сезонных серий снимков КА Landsat с помощью самоорганизующихся нейронных сетей Кохонена, реализованных в программном комплексе Scanex Image Processor. Показано, что такой подход существенно расширяет возможности оценки НБДЗ, как в результате детализации оценки и установления большего количества картографических выделов и контуров, так и при использовании матрицы оценки переходов, основанной на расширенной классификации наземного покрова. Применение модуля Change Detection программного комплекса SAGAGIS позволяет не только выявлять характер восстановительных и деградационных изменений, но и проводить сравнительные оценки трендов для различных угодий и категорий земель. Совокупность предложенных подходов, реализованная в виде функционального алгоритма, может быть рекомендована для мониторинга и оценки достижения НБДЗ на локальном уровне.

Ключевые слова: нейтральный баланс деградации земель, опустынивание, материалы дистанционного зондирования земли, изменения наземного покрова.

DOI: 10.24412/1993-3916-2023-1-59-69

EDN: WHOCSS

Одной из задач, решаемых в рамках Конвенции ООН по борьбе с опустыниванием (КБО ООН), является стандартизация методов оценки деградации земель на глобальном уровне для проведения сравнимых наблюдений за динамикой этого явления в странах и регионах. К настоящему времени можно считать, что основа для таких методов сформулирована и заключается в концепции НБДЗ, отдельные аспекты которой ранее рассматривались нами, в том числе и в журнале «Аридные экосистемы» (Куст и др., 2020; Tsybgarovich и др., 2020; Беляева и др., 2020).

Напомним, что под НБДЗ понимается «такое состояние, при котором объем и количество земельных ресурсов, необходимых для поддержания экосистемных функций и услуг и усиления продовольственной безопасности, остаются стабильными или же увеличиваются в конкретно определенных временных и пространственных масштабах и экосистемах» (определение принято на 12 Конференции сторон Конвенции ООН по борьбе с опустыниванием (КБО ООН) в сентябре 2015 г. (UNCCD, 2016). Этот подход используется в расчетном модуле Trends.Earth (Trends.Earth Documentation. Release 1.0.4., 2021), предлагаемом КБО ООН в качестве базового метода для подготовки и представления национальных данных по оценке деградации земель и достижению НБДЗ, а также в национальной отчетности по достижению задачи 15.3 Целей устойчивого развития ООН, индикатор 15.3.1 – доля деградированных земель от общей площади суши.

Принцип работы Trends.Earth заключается в использовании трех основных индикаторов, предлагаемых в рамках КБО ООН (UNCCD-GM, 2016): динамика наземного покрова, динамика продуктивности, динамика запасов органического углерода почв.

Согласно определению, данному ФАО, наземный покров – наблюдаемый биофизический покров на поверхности Земли. При этом в узком смысле под land cover подразумевается растительный покров и объекты, созданные человеком (Di Gregorio, A.; Jansen, Louisa J.M., 2000).

В расчетном модуле Trends.Earth используется классификация типов наземного покрова, предлагаемая ФАО ООН (Land cover CCI, 2017). Данная классификация представлена 37 классами, генерализованными в 7 основных классов для целей глобальной оценки: 1) пашня, 2) травянистые сообщества, 3) древесная растительность, 4) болота, 5) антропогенные территории, 6) участки, лишенные растительности, 7) водные объекты.

Для оценки динамики наземного покрова, динамики продуктивности, динамики запасов органического углерода почв используются глобальные базы данных, включающие ГИС-данные и космические снимки. На их основе строятся слои, отражающие ежегодное состояние каждого из индикаторов, рассчитывается их динамика за выбранный промежуток времени (начиная с 2000 г.). Присвоение качественной характеристики выявленным трендам (деградация, проградация, отсутствие изменений) позволяет при наложении картографических слоев трендов всех трех индикаторов выявлять территории с негативной динамикой, используя принцип «one out, all out».

Динамика наземного покрова – это основной индикатор модуля Trends.Earth, оценка которого может выполняться с использованием материалов дистанционного зондирования Земли, что позволяет проводить ретроспективный анализ НБДЗ, свести к минимуму трудоемкие полевые исследования, выполнять оценку для больших территорий в относительно короткие сроки.

Модуль Trends.Earth разрабатывался для целей глобальной оценки деградации земель и, как было показано нами ранее (Беляева и др., 2020), недостаточно точно отражает изменения на локальном и региональном уровне из-за низкого пространственного разрешения (300 м); количество классов наземного покрова недостаточно для отражения специфики территории на локальном уровне; типы переходов не всегда отображают специфику деградационных процессов на конкретной территории (Отчет о НИР, 2021; Славко, Куст, 2022).

С учетом этих обстоятельств задачи нашей работы заключались в том, чтобы оценить возможности и результаты использования преобразованной матрицы переходов классов наземного покрова, устанавливаемых с использованием дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) более высокого разрешения и расширенной (адаптированной для местного уровня) классификации наземного покрова.

С целью валидации результатов оценки в 3-х километрах на юго-запад от оз. Эльтон был заложен ключевой участок Pgi. Территория представляет собой залежь 17-летней давности, в настоящее время находящуюся под выпасом. Точки опробования (всего 4) были заложены по градиенту увеличения пастбищной нагрузки по мере приближения к кошаре (месту содержания скота). В качестве эталонного участка условнонарушенных почв была взята точка Vul 3 ключевого участка Vul, расположенная в 20 км северо-восточнее от оз. Булухта. Для данного участка отмечается отсутствие пахотной нагрузки за период наблюдения КА Landsat, пастбищная нагрузка также низкая в связи с большой удаленностью от кошар.

Каждая точка опробования представляет собой площадку размером 300×300 м*, гомогенную с точки зрения растительности и структуры почвенного покрова. Для каждой точки закладывались опорные почвенные разрезы, измерялись морфологические, физико-химические показатели почв, проводилось описание растительного покрова.

Объекты и методы исследований

Тестовый полигон расположен в Волгоградской области в Эльтонской котловине и представлен ячеистыми ландшафтами с полынно-типчакково-ковыльными и полынно-типчakovыми степями с участками орошаемого и богарного земледелия и пастбищ как на степных участках, так и на залежах

*Размер площадок закладывался с целью дальнейшего использования в качестве эталонов при обучении нейронных сетей.

разного возраста.

В работе исследовались результаты применения нескольких способов оценки динамики наземного покрова: 1) с помощью программного модуля Trends.Earth; 2) с сохранением алгоритма Trends.Earth, но на основании анализа материалов ДЗЗ КА Landsat 4-5, Landsat 8 с большим пространственным разрешением (~30 м), чем используемые в Trends.Earth; 3), то же, но с использованием расширенной классификации наземного покрова, проведенной по результатам наземной валидации.

В расчетном модуле Trends.Earth оценка динамики наземного покрова производится в терминах «деградация», «улучшение», «изменения отсутствуют» на основе таблицы переходов типов наземного покрова (Trends.Earth Documentation. Release 1.0.4., 2021). Оценка по материалам (ДЗЗ) КА Landsat 4-5, Landsat 8 производилась на основе анализа серий многоканальных космических снимков КА Landsat 4-5, и Landsat 8 с помощью самоорганизующихся нейронных сетей Кохонена, реализованных в модуле Thematic Pro программного комплекса Scanex Image Processor 5.1. Общая последовательность выполнения работ представлена в схеме на рис. 1.

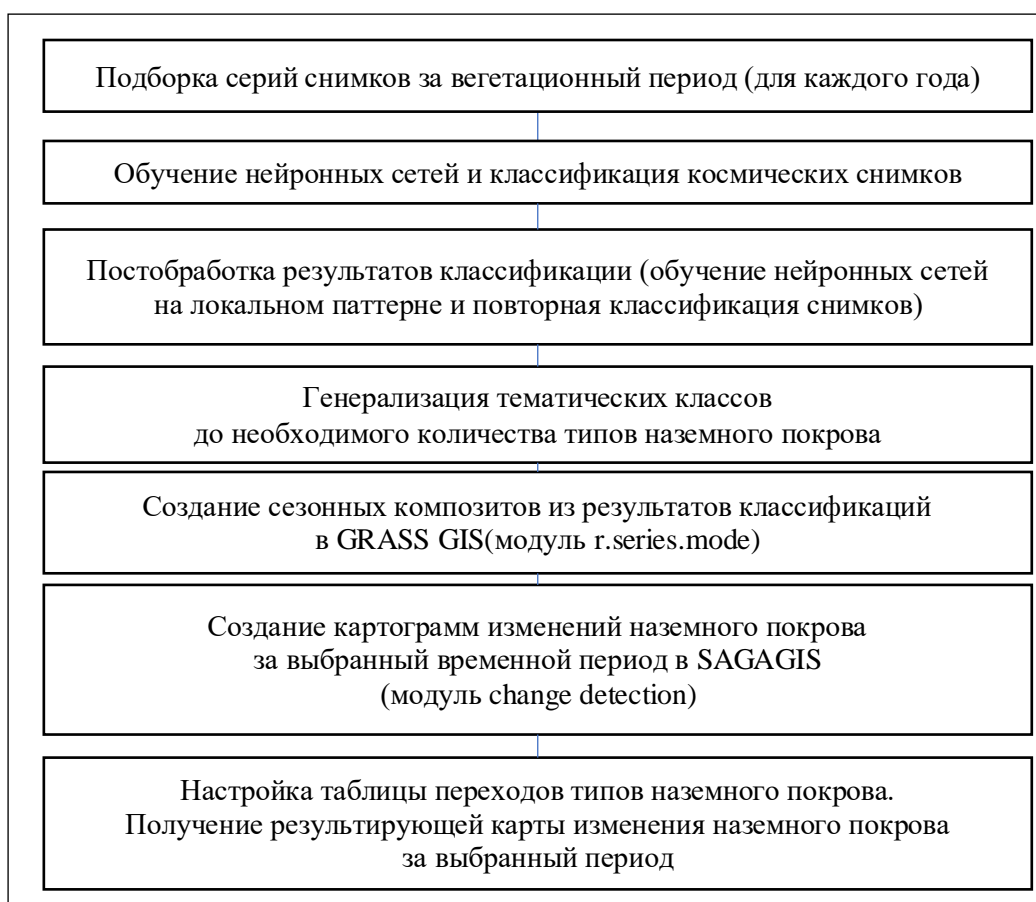
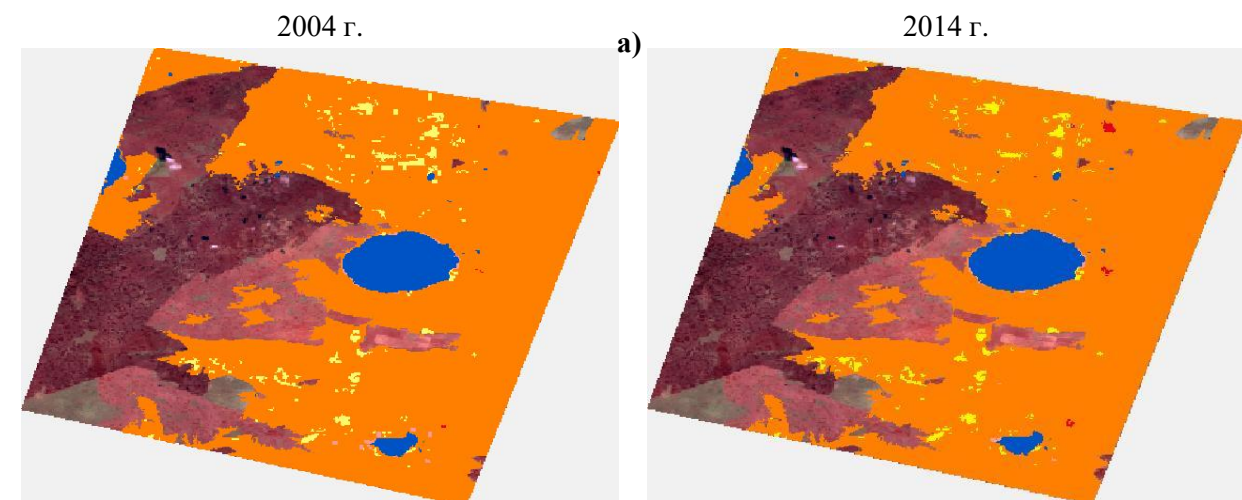








Рис. 1. Блок-схема анализа изменений наземного покрова на основании данных КА Landsat 4-5, Landsat 8.

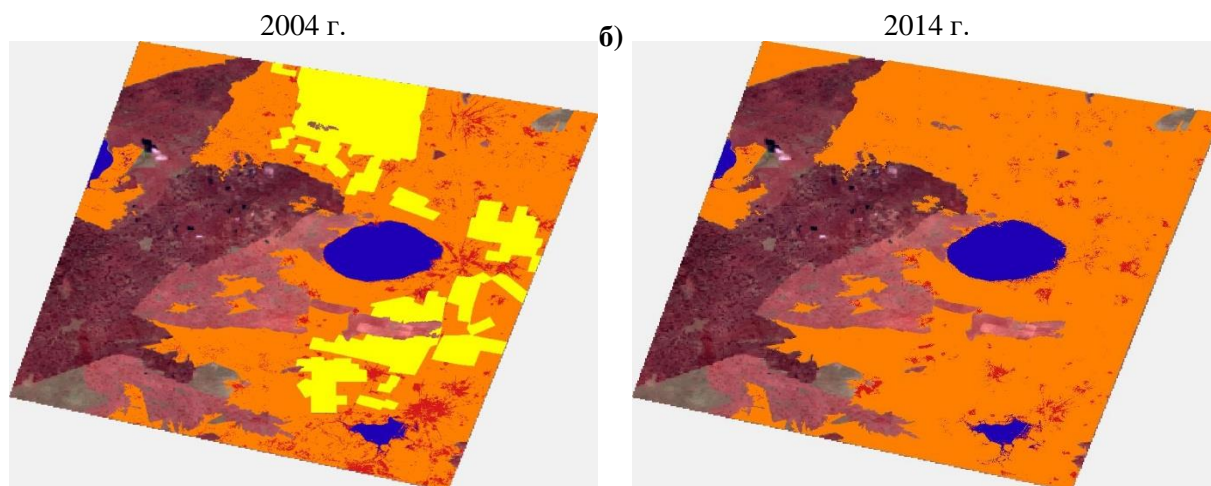
В работе использовался синтез 7-4-2 каналов Landsat 4-5 и аналогичный ему синтез 7-5-3 каналов Landsat 8. Такие синтезы каналов позволяют детектировать открытые участки почвы, минеральных отложений, оценивать состояние растительности, степень увлажнения почвы, развитие процессов засоления (Quinn J.W., 2001).

В 2014 г. территория тестового полигона была подвержена обширным степным пожарам (рис. 2). Выгоревшие территории не входили в анализ, для их исключения была подготовлена векторная маска, полученная на основе автоматической оцифровки картограмм индекса NBR – normalized burned ratio (Key, Benson, 2005), на рис. 2 представлена в красно-коричневой гамме. Для исключения ошибочного отнесения участков, занятых пашней, к классу наземного покрова «степная

растительность» (из-за особенностей севооборота) была создана векторная маска пашни, в границах которой пиксели были принудительно отнесены к классу наземного покрова «пашня».



	Тип наземного покрова	Площадь 2004 г., %	Площадь 2014 г., %
	Древесная растительность	0.01	0.01
	Степная растительность	91.51	91.82
	Пашня	2.49	2.14
	Антропогенные объекты	0.03	0.18
	Другие территории	0.29	0.18
	Водные объекты	5.68	5.68





	Тип наземного покрова	Площадь 2004 г., %	Площадь 2014 г., %
	Водные объекты	6.10	6.08
	Участки, лишённые растительности	6.54	2.73
	Степная растительность	63.51	91.19
	Пашня	23.85	0.00

Рис. 2. Картограммы наземного покрова по состоянию на 2004 и 2014 гг., получаемые с использованием разных ДЗЗ и методов их обработки. Исходный масштаб 1:300 000. Координаты левого верхнего угла 46.1727E, 49.5808N. *Условные обозначения:* а – картограмма наземного покрова, полученная с помощью Trends.Earth, б – картограмма, полученная на основе анализа данных КА Landsat, в – картограмма, полученная на основе анализа данных КА Landsat и адаптированной классификации выделов.

от общей площади тестового участка), условно не деградированные пастбища – слабо деградированные пастбища (9.49 %), умеренно деградированные пастбища – слабо деградированные пастбища (5.62 %), пашня – умеренно деградированные пастбища (4.69 %), слабо деградированные пастбища – умеренно деградированные пастбища (4.48 %). При анализе с помощью Trend.Earth такая информация о качественных изменениях в наземном покрове не может быть получена, поскольку все детали и особенности переходов скрыты под единым выделом «степная растительность».

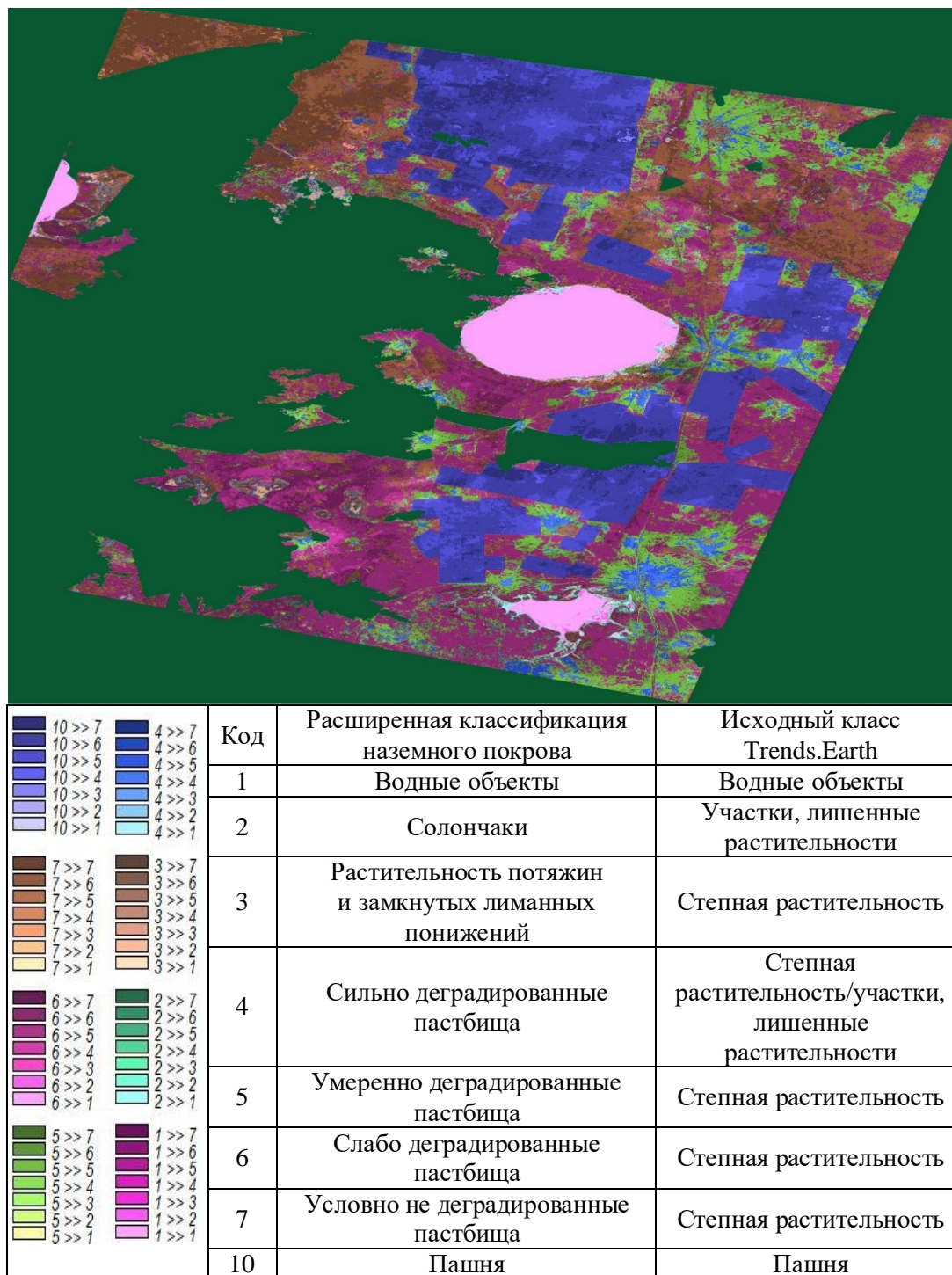


Рис. 3. Картограмма изменения наземного покрова тестового полигона за период с 2004 по 2014 гг. Численные коды изменений соответствуют кодам таблицы.

Изменение land cover тестового полигона за период с 2004 по 2014 гг.

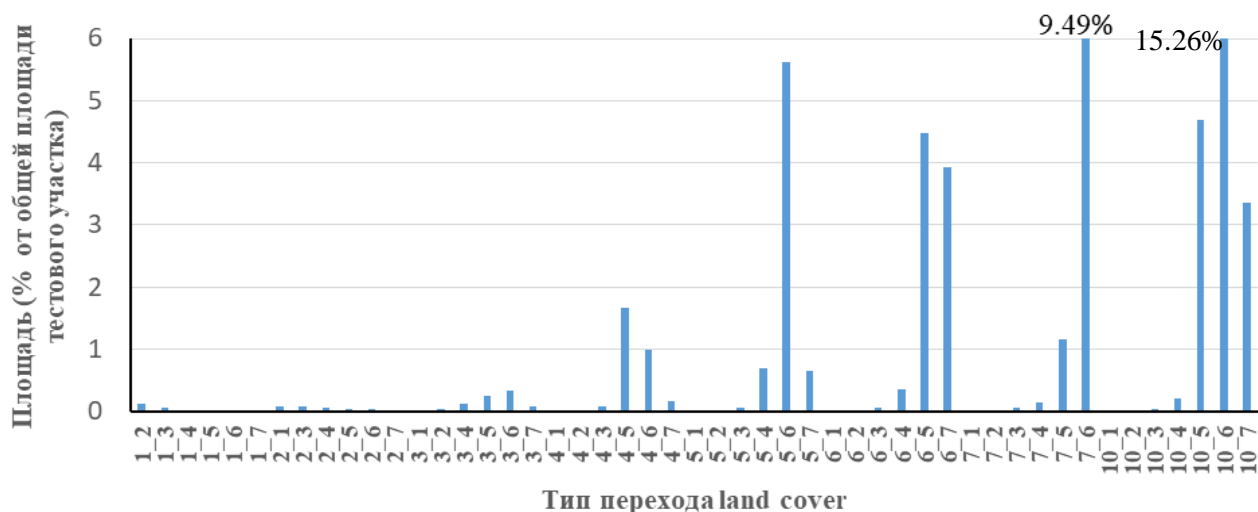


Рис. 4. Гистограмма типов изменений наземного покрова. Коды соответствуют легенде рис. 3

В целях качественной оценки деградации земель в терминах «улучшение – отсутствие изменений – деградация», используемой при анализе достижения НБДЗ, полученные результаты позволяют скорректировать матрицу положительных и отрицательных переходов наземного покрова для данного тестового участка. Результат представлен в табл. 1.

Таблица 1. Матрица переходов для оценки НБДЗ при использовании расширенной классификации наземного покрова на локальном уровне (зеленый – улучшение, красный – деградация, желтый – отсутствие изменений).

Изначальный класс наземного покрова	Конечный класс наземного покрова							
	водные объекты	солончаки	растительность потяжин и замкнутых лиманных понижений	деградированные пастбища			условно не деградированные пастбища	пашня
				сильно	умеренно	слабо		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Водные объекты	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Солончаки	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Растительность потяжин и замкнутых лиманных понижений	Yellow	Red	Yellow	Red	Red	Red	Yellow	Red
Сильно деградированные пастбища	Yellow	Red	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green
Умеренно деградированные пастбища	Yellow	Red	Green	Red	Yellow	Green	Green	Green

Продолжение таблицы 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Слабо деградированные пастбища	Yellow	Red	Green	Red	Red	Yellow	Green	Green
Условно не деградированные пастбища	Yellow	Red	Green	Red	Red	Red	Yellow	Green
Пашня	Yellow	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow

На основании данной матрицы переходов была подготовлена итоговая картограмма деградации земель тестового полигона по индикатору «динамика наземного покрова» в соответствии с методологией НБДЗ (рис. 5б). Для сравнения приведена аналогичная картограмма, подготовленная с использованием стандартной матрицы, используемой по умолчанию в Trend.Earth (рис. 5а, цит. по Славко, Куст, 2022).

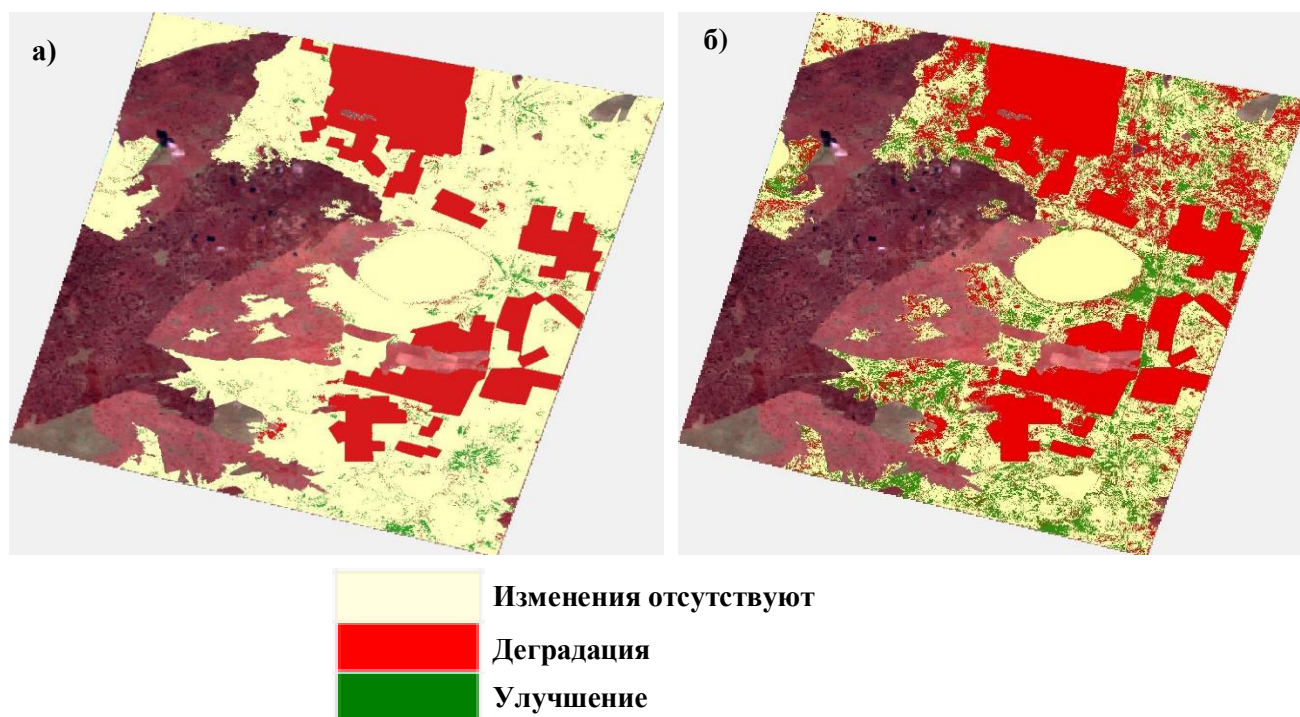


Рис. 5. Оценка деградации наземного покрова тестового полигона за период с 2004 по 2014 г. с использованием разных классификаций и оценочных матриц. Условные обозначения: а – с использованием оценочной матрицы Trends.Earth (по умолчанию), б – с использованием расширенной классификации выделов и оценочной матрицы, адаптированной для местных условий.

Сравнение картограмм, полученных для тестового полигона на основе обработки серий снимков КА Landsat 4-5, Landsat 8 с помощью нейронных сетей, использующих стандартную классификацию и расширенную классификацию наземного покрова, показывает, что расширенная классификация позволяет выявлять большее количество переходов типов наземного покрова, чем стандартная классификация Trends.Earth, и большее количество участков деградационных / проградационных изменений в пределах тестового полигона. В табл. 2 представлены результаты сводной оценки деградации земель с помощью различных подходов. Анализ таблицы показывает, что по уточненным данным ситуация с деградацией земель оказывается более контрастной, то есть отмечается увеличение доли земель как с признаками деградации, так и с признаками улучшения. В частности,

выявляются признаки улучшения пастбищ. Так, например, на рис. 6 представлен фрагмент снимка 2004 г., где заметно, что площадь отчетливо видимых скотопрогонных участков и троп (высветленных областей, что соответствует классу наземного покрова «сильно деградированные пастбища») больше, чем на снимке 2014 г.

Таблица 2. Сравнение результатов оценки деградации земель (с использованием материалов ДЗЗ КА Landsat 4-5 и Landsat 8), полученных с помощью различных методов

Тип изменений	Стандартная классификация наземного покрова	Расширенная классификация наземного покрова)
	площадь (в % от общей площади тестового полигона)	
Деградация	24.64	40.62
Улучшение	2.87	13.38
Нет изменений	72.49	45.98

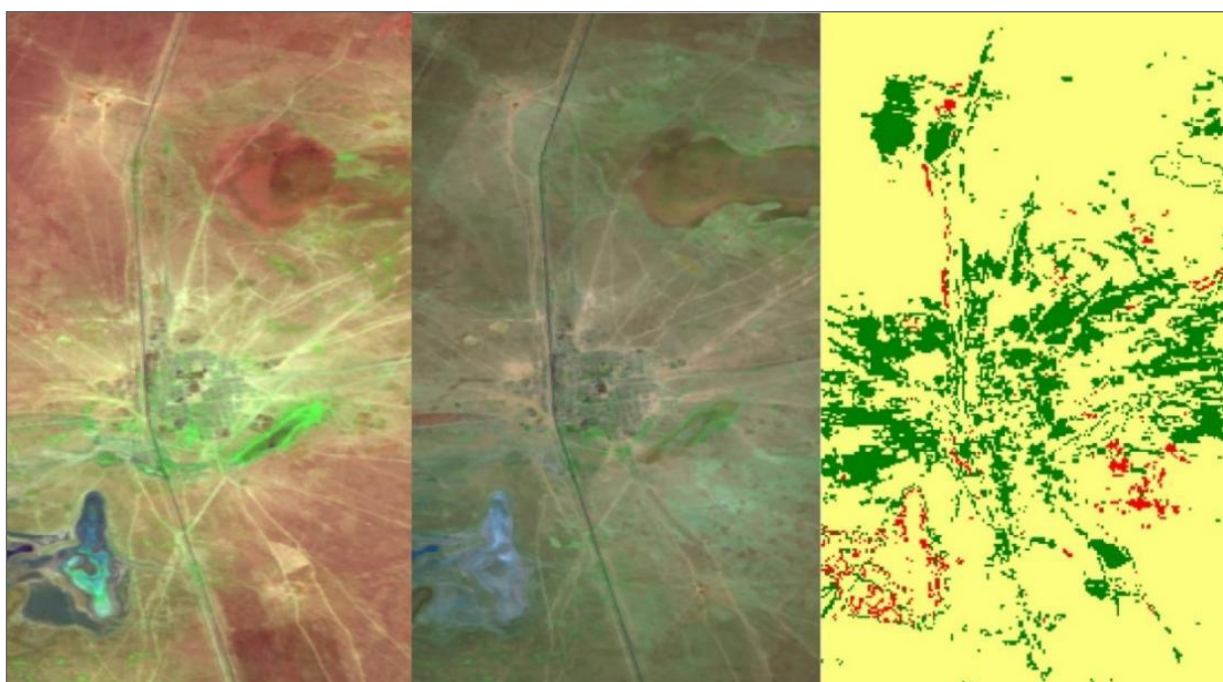


Рис. 6. Пример восстановления деградированных пастбищ. Слева фрагмент снимка КА Landsat 4-5 16.08.2004 (синтез 7,4,2 каналов), в центре фрагмент снимка КА Landsat 8 03.08.2014 (синтез 7,5,3 каналов), справа фрагмент картограммы деградации наземного покрова. На рисунке видно уменьшение высветленных участков, соответствующих сильно выбитым пастбищам.

Использование расширенной классификации наземного покрова и оценочной матрицы, совокупно с обработкой с помощью Change Detection, позволяет также более дифференцированно оценивать изменения, происходящие с отдельными категориями земель и угодьями. Например, для исследуемого тестового участка было установлено, что доля деградированных земель в структуре пастбищных угодий меньше (22.2%), чем доля деградированных земель относительно всей площади тестового полигона (40.6%). При этом доля земель, оцениваемых как улучшенные, за период с 2004 по 2014 гг. в структуре пастбищных земель незначительно выше (17.5%), чем доля улучшенных земель в целом по территории (13.4%), что связано в первую очередь с тем, что забрасывание ранее продуктивных сельскохозяйственных полей и переход их в пастбищные угодья оценивается как деградационное изменение. Для участков пастбищ, ранее не использовавшихся в качестве пашни, отмечается снижение доли сильно деградированных земель (с 5.3 до 2.6%) при существенном увеличении доли слабо деградированных пастбищ (с 39.8 до 50.4%). Подобная картина объясняется

тем, что при забрасывании пахотных земель произошло восстановление естественной степной растительности и перераспределение пастбищной нагрузки за счет залежей, в том числе на участках, примыкающих к загонам для скота (см. рис.6).

Выводы

1. Для оценки НБДЗ по индикатору динамики наземного покрова на местном уровне анализ серий многоканальных космических снимков КА Landsat 4-5, и Landsat 8 с помощью самоорганизующихся нейронных сетей позволяет существенно детализировать результаты по сравнению с результатами, получаемыми с использованием модуля Trend.Earth, рекомендуемого КБО ООН для оценок на глобальном уровне.

2. Помимо использования космических снимков с повышенным разрешением для удобства выявления деградационных процессов тестовой территории предлагается использовать расширенную классификацию наземного покрова с выделением подклассов состояния пастбищ, имеющих важное значение для конкретного тестового полигона.

3. Показана возможность и приведен пример разработки уточненной матрицы переходов для качественной оценки НБДЗ в терминах «деградация – нет изменений – улучшение земель», составленной на базе расширенной системы классов наземного покрова.

4. Совокупность предложенных подходов, реализованная в виде функционального алгоритма, может быть рекомендована для мониторинга и оценки достижения НБДЗ на локальном уровне.

5. Для тестового полигона (в пределах Эльтонской котловины) в период с 2004 по 2014 гг. выявлено уменьшение доли сильно деградированных пастбищ и рост доли умеренно деградированных и слабо деградированных пастбищ, что связано как с увеличением площади пастбищных земель за счет забрасывания пахотных угодий, так и в связи со снижением пастбищной нагрузки на участках, примыкающим к водопоям и загонам для скота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беляева М.В., Андреева О.В., Куст Г.С., Лобковский В.А.* 2020. Опыт оценки динамики деградации земель юга Европейской части России с использованием методологии нейтрального баланса деградации земель // Экосистемы: экология и динамика. Т. 4. № 3. С. 145-165.
- Добровольский Г.В., Федоров К.Н., Стасюк Н.В., Можарова Н.В., Быкова Е.П.* 1991. Типизация структур почвенного покрова равнинного Дагестана и его антропогенная устойчивость // Почвоведение. № 3. С. 5-13.
- Карибаева К.Н., Курочкина Л.Я.* 1991. Смены растительности и их регулирование при пастбищном использовании (Таукумы). Алма-Ата: Гылым. 168 с.
- Куст Г.С., Андреева О.В., Лобковский В.А.* 2020. Нейтральный баланс деградации земель – современный подход к исследованию засушливых регионов на национальном уровне // Аридные экосистемы. Т. 26. № 2 (83). С. 3-9.
- Можарова Н.В., Федоров К.Н.* 1990. Эволюция почвенных мезоструктур аккумулятивно-морской равнины Терско-Кумской низменности // Биологические науки. № 2. С. 15-20.
- Отчет о НИР по государственной теме FMWS-2019-0010 «Разработка научных основ устойчивого управления природно-антропогенными системами на основе моделей сбалансированного землепользования (заключительный)». 2021. Институт географии РАН. М. 200 с.
- Программа обработки данных дистанционного зондирования ScanEx Image Processor v 5.1. Модуль тематической интерпретации (Тематик Про). Руководство пользователя. 2019. М.
- Славко В.Д., Андреева О.В., Куст Г.С.* 2022. Особенности оценки динамики наземного покрова на локальном уровне с использованием космических снимков (на примере сухостепного Заволжья) // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. № 5. (в журнале 4 выпуска в год) в номерах за 2022 г. такой статьи нет.
- Смагин А.В.* 2012. Теория и практика конструирования почв М.: Изд-во Московского университета. 544 с.
- Conard O.* SAGA-GIS Module Library Documentation (v 2.1.3). 2010 [Электронный ресурс https://saga-gis.sourceforge.io/saga_tool_doc/2.1.3/imagery_classification_2.html (дата обращения 02.06.2022)].
- Di Gregorio A., Jansen, Louisa J.M.* Land Cover Classification System: Classification Concepts and User Manual FAO. 2000. [Электронный ресурс http://www.fao.org/docrep/003/x0596e/X0596e00.htm#P-1_0 (дата обращения 02.06.2022)].
- Huang D., Wang K., Wu W.L.* 2007. Dynamics of soil physical and chemical properties and vegetation succession characteristics during grassland desertification under sheep grazing in an agropastoral transition zone in Northern China // Journal of Arid Environments. Vol. 70. № 1. P. 120-136.

- Key C. and N. Benson N. 2006. "Landscape Assessment: Remote Sensing of Severity, the Normalized Burn Ratio; and Ground Measure of Severity, the Composite Burn Index." In FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System, RMRS-GTR, Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 56 с.
- Land cover CCI. Product User Guide. Version 2.0. [Электронный ресурс http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-Ph2-PUGv2_2.0.pdf (дата обращения 02.06.2022)].
- Orr B. J., Cowie A. L., Castillo V. M. S., Chasek P., Crossman N. D., Erlewein A., Welton S. 2017. Scientific conceptual framework for land degradation neutrality. Bonn, Germany: United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). A Report of the Science-Policy Interface [Электронный ресурс <https://www.unccd.int/resources/publications/scientific-conceptual-framework-land-degradation-neutrality-report-science> (дата обращения 02.06.2022)].
- Quinn J. W. 2021. Summary of Band Combinations. [Электронный ресурс http://web.pdx.edu/~nauna/resources/10_Band_Combinations.htm (дата обращения 02.06.2022)].
- Trends.Earth Documentation. Release 1.0.4. 30.06.2021. Trends.Earth [https://trends.earth/docs/en/pdfs/Trends.Earth.pdf(дата обращения 02.06.2022)].
- Tsymbarovich Petr, Kust German, Kumani Mikhail, Golosov Valentin, Andreeva Olga. 2020. Soil erosion: An important indicator for the assessment of land degradation neutrality in Russia // International Soil and Water Conservation Research. 2020. Т. 8. № 4.Р. 418-429.
- UNCCD. Land Degradation Neutrality: The Target Setting Programme. 2016. https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2017-03/ldn_ts_low_res.pdf(дата обращения 02.06.2022)].
- UNCCD-GM. 2016. Achieving Land Degradation Neutrality at the country level - Building blocks for LDN.Target Setting. Bonn, Germany: Global Mechanism (GM) of the United Nations Conventions to Combat Desertification (UNCCD). [Электронный ресурс http://www2.unccd.int/sites/default/files/documents/18102016_LDN%20country%20level_ENG.pdf (дата обращения 01.10.2019)].