

Тенденция опустынивания Северо-Западного Прикаспия по MODIS-данным

А.Н. Золотокрылин, Т.Б. Титкова

Институт географии РАН
119017 Москва, Старомонетный пер. 29
E-mail: azolotokrylin1938@yandex.ru

Предложен новый подход в изучении динамики очагов опустынивания на примере засушливых земель Северо-Западного Прикаспия. По данным спутниковых наблюдений за альбедо и температурой поверхности за период 2000-2009 гг. выделены очаги опустынивания природного и антропогенного происхождения с усилением аридизации обратной связью альбедо-осадки. Из сравнения очагов в 2005-2009 и 2000-2004 гг. выявлены разнонаправленные изменения их площади: Черноземельский очаг сократился, а в Астраханской области и Западном Казахстане очаги расширились, и произошло их слияние.

Ключевые слова: засушливые земли, опустынивание, аридизация, деградация земель, альбедо и температура поверхности, мезомасштабная обратная связь альбедо-осадки.

Введение

Опустынивание в точном обозначении этого понятия означает результат взаимодействия аридизации и антропогенно-природной деградации засушливых земель. Под аридизацией климата понимается не только уменьшение атмосферного увлажнения территории, но и вызывающие иссушение мезомасштабные процессы ее теплообмена с пограничным слоем атмосферы. В этом случае аридизация поддерживается положительной обратной связью альбедо-осадки (Золотокрылин, 2003). Основанием для формирования положительной обратной связи служит отрицательная корреляция между альбедо и температурой поверхности, вызывающая понижение температуры поверхности с ростом альбедо при изреживании растительного покрова.

Примером такого взаимодействия можно считать положительную обратную связь альбедо-осадки в пограничном слое атмосферы, известную как гипотезу мезомасштабного альбедного механизма опустынивания Оттермана (Otterman, 1974).

Согласно гипотезе, засушливые земли с сильно деградированным растительным покровом имеют более высокое альбедо и более низкую дневную температуру поверхности по сравнению с менее деградированными участками. В случае расширения деградированных участков до мезомасштаба (~50-100 км) над ними начинают преобладать нисходящие воздушные потоки, которые приводят к размыванию кучево-дождевых облаков и к локальному уменьшению выпадающих осадков. Снижение осадков усиливает деградацию, что вызывает новое повышение альбедо поверхности. Таким образом, усиливающаяся деградация растительного покрова поддерживает аридизацию, а аридизация – деградацию.

Данная гипотеза может быть основанием для разработки подхода к получению новой информации о динамике опустынивания в условиях меняющегося климата. Эта информация касается территориальной дифференциации аридизации, степень интенсивности которой определяется обратными связями с деградационными процессами (пастьбищная дигressия, ветровая эрозия, засоление и т.д.). Таким образом, меняющаяся картина деградационных процессов на засушливых землях дополняется оценкой их взаимодействия с аридизацией. Она

позволит более углубленно трактовать результаты наземных и дистанционных наблюдений за деградационными процессами, которые уже зафиксированы в картографических материалах.

В данной статье применение подхода рассматривается на примере засушливых земель Северо-Западного Прикаспия. По данным спутниковых наблюдений за альбедо и температурой поверхности за период 2000-2009 гг. предполагается: (1) выделить затрагиваемые опустыниванием деградированные земли природного и антропогенного происхождения с усилением аридизации обратной связью альбедо-осадки; (2) из сравнения двух пятилетних периодов получить оценку тенденции опустынивания.

Существо подхода

Подход базируется на разработанной в конце XX в. гипотезе о климатическом опустынивании с обратными связями альбедо-осадки (Золотокрылин, 2003). Согласно этой гипотезе климатическое опустынивание доминирует в аридных землях и поддерживается региональной положительной обратной связью альбедо-осадки.

Положительная обратная связь поддерживается структурой теплового баланса поверхности, в котором почти все поглощенное радиационное тепло тратится на турбулентный прогрев приземной атмосферы. В этих условиях характерно радиационное регулирование температуры поверхности, которое выражается отрицательной корреляцией между альбедо и температурой поверхности. Иными словами, повышение альбедо поверхности сопровождается падением ее температуры, снижением конвекции, уменьшением облачности и в результате уменьшением частоты и количества региональных осадков. Таким образом, происходит самоподдержание климатического опустынивания.

В с semiаридных землях происходит процесс замещения положительной обратной связи на отрицательную, которая становится доминирующей в субгумидных землях. В районах с выраженным растительным покровом (поймы и дельты транзитных рек, разливы бессточных рек и т.д.) возникают условия для формирования мезомасштабной отрицательной обратной связи альбедо-осадки, препятствующей климатическому опустыниванию. Основанием отрицательной обратной связи становится эвапотранспирационное регулирование температуры поверхности. В этих районах заметная часть поглощенного поверхностью радиационного тепла уже тратится на транспирацию и испарение. В результате с увеличением альбедо поверхности возрастает и ее температура (между ними возникает положительная корреляция), так как часть тепла, тратившегося на транспирацию, переключается на турбулентный прогрев приземной атмосферы.

В то же время в semiаридных землях продолжают сохраняться отдельные районы с выраженной мезомасштабной положительной обратной связью. Это крупные массивы пустынных песков, обширные депрессии с солончаками, а также крупные очаги пастбищной дигрессии. В этих районах наблюдается локальное уменьшение осадков по сравнению с региональными, в следствии частого размывания облаков (механизм опустынивания Оттермана, 1975). В итоге semiаридные земли представляет собой мозаику районов, с положительными и отрицательными обратными связями альбедо-осадки.

В субгумидных землях доминирующими становятся условия, благоприятствующие формированию отрицательной обратной связи. Но и здесь нередко возможно появление очагов антропогенной деградации земель с мезомасштабной положительной обратной связью.

Таким образом, взаимодействие аридизации и природно-антропогенной деградации на засушливых землях может быть выражено двумя типами регулирования температуры поверхности: радиационным и эвапотранспирационным. Они могут быть определены по знаку корреляции между альбедо и температурой поверхности. Взаимодействие аридизации и деградированных земель с радиационным терморегулированием поверхности усиливает аридизацию, а с эвапотранспирационным – сдерживает.

Территория, данные и методика исследования

Территория исследования охватывает целиком Северо-Западный Прикаспий и часть Северного Прикаспия и ограничена 45-50°с.ш. и 44-51°в.д. Территория состоит из российской части (Калмыкия, Астраханская и южные районы Волгоградской и Саратовской областей), а также западных районов Казахстана. Территория представлена субгумидными, с semiаридными и аридными землями. Согласно «Фитоэкологической карте Северного Прикаспия» здесь имеют зональное распространение средние (сухие) степи на каштановых почвах, южные (опустыненные) степи на светлокаштановых почвах, северные пустыни на бурых почвах и сельскохозяйственные земли на их месте (Сафронова, 2002).

В работе использованы данные альбедо и среднемесячной температуры поверхности Центра LP DAAC NASA: LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER, представленные на сайте https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products. Входные данные с разрешением 0.05° (в среднем 5600-метров), исправленные, очищенные от облаков, для 2000-2009 гг. Для всех параметров использовалась географическая сетка моделирования климата (CMG)

Для альбедо (BRDF-Albedo Model Parameters 16-Day L3 0.05Deg CMG) использовалась модель MCD43 C1 версии 005. «MCD» – означает, что объединялись самые качественные данные спутников MODIS/Terra+Aqua BRDF/Albedo.

Среднемесячное альбедо было вычислено за следующие сроки: май: 30 апреля – 15 мая, 16-31; июнь: 1-16, 17 июня – 2 июля; июль: 3-18, 19 июля – 3 августа; август: 4-19, 20-28; сентябрь: 29 августа – 12 сентября, 13 сентября – 29 сентября.

Для среднемесячной температуры поверхности (Land Surface Temperature and Emissivity Monthly L3 Global 0.05 Deg CMG) использовалась модель MOD11 C3 версии 005. Данные спутника MODIS/Terra. Использовались уже подготовленные среднемесячные значения температуры.

Месячные коэффициенты корреляции рассчитывались для участков 0.5x0.5° месячных полей альбедо и температуры поверхности. Каждый участок включал 10x10=100 измерений. Месячные карты поля корреляции строились в системе MATLAB. В итоге анализировались средние месячные карты коэффициентов корреляции для периода 2000-2004 и 2005-2009 гг. Отрицательный коэффициент корреляции обозначает территорию, аридизация которой усиливается. Считается, что эта территория подвержена опустыниванию. При этом величина коэффициента корреляции характеризует интенсивность опустынивания. На деградированных территориях с низким положительным коэффициентом корреляции возможна слабая аридизация, а на территориях с высоким – аридационные процессы маловероятны.

Глобальные среднемесячные значения индекса растительности NDVI были получены по данным MODIS/Terra модели MOD13C2 (варианта-005) (Vegetation Indices Monthly L3 Global 0.05Deg CMG). Временная дискретность составляет 1 месяц.

В работе использована также карта природного районирования Прикаспийской низменности (Северного Прикаспия) (Доскач, 1979).

Результаты

Пример распределения среднемесячного коэффициента корреляции между альбедо и температурой поверхности на исследуемой территории за июнь 2000-2004 и 2005-2009 гг. представлен на рис. 1 а,б. Территории с отрицательной корреляцией выделены цветами – от бледновато-желтого до красного. Цветами от бледно-зеленого до темно-зеленого закрашена область с положительным коэффициентом корреляции.

По нашей оценке распределение коэффициента в целом отражает природное районирование территории А.Г. Доскач (1979) (рис.1 а,б). Высокий положительный коэффициент корреляции, указывающий на отсутствие или слабую локальную аридизацию характерен для области «Волго-Ахтубинская пойма и дельта Волги». Слабый положительный коэффициент корреляции распространен на субгумидных землях к западу от Волги, а также в районах Узенско-Чижинской системы разливов бессточных рек и Урало-Кушумской суглинистой равнины на территории Казахстана.

На рис. 1а,б четко выделяются очаги затрагиваемых опустыниванием земель с отрицательным коэффициентом корреляции. Так, на рис. 1а выделяется очаги на Центрально-Черноземельской песчаной равнине, на Эльтонско-Боткульской супесчаной озерно-солончаковой равнине и в Харабалинском и Красноярском районах Астраханской области.

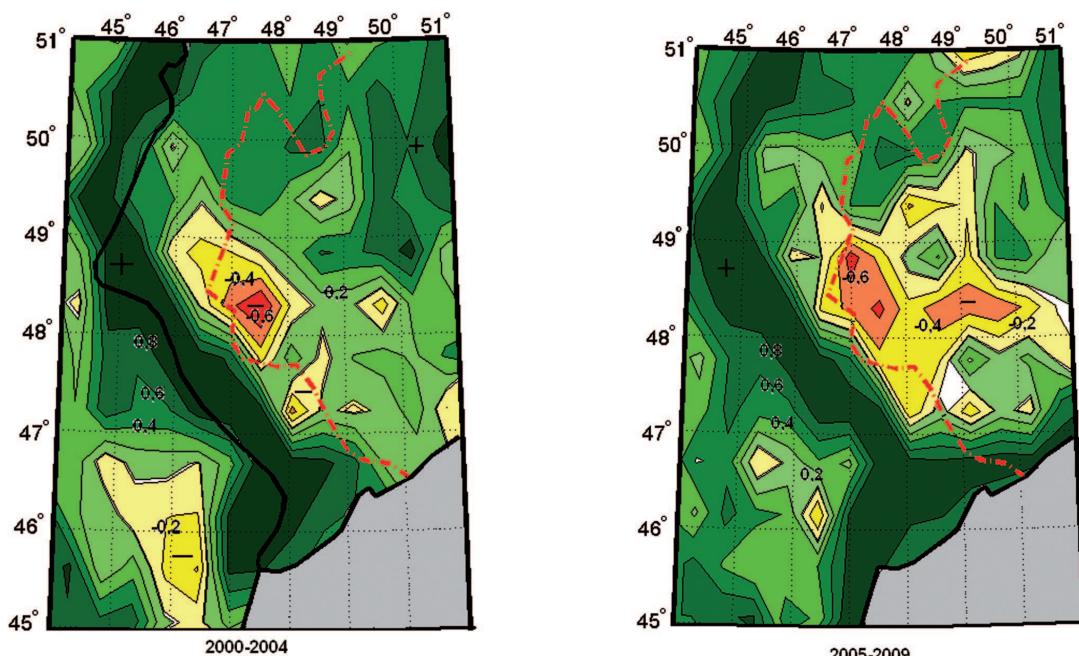


Рис.1. Очаги опустынивания в Северо-Западном Прикаспии в периоды а) 2000-2004 и б) 2005-2009 гг. (в очагах отрицательная корреляция между альбедо и температурой поверхности – желтая, темно-желтая и красная заливка), положительная корреляция – зеленые тона. Июнь

Центрально-Черноземельский очаг опустынивания возник во второй половине XX века в результате длительной пастбищной дигрессии (Виноградов и др., 1999). К 1987 г. он достиг максимальных размеров. Неожиданно начавшееся восстановление растительного покрова в Северо-Западном Прикаспии в конце 1980-х годов, вызванная как ослаблением засушливости регионального климата, так и резким падением пастбищной нагрузки (Неронов, 1998; Виноградов и др., 1999; Золотокрылин, Виноградова, 2007), а также положительным эффектом фитомелиоративных работ (Виноградов и др., 1999), заметно сократила площадь очага к 2000 году. Организованный в 1990-х годах биосферный заповедник «Черные Земли» и его буферные зоны также сыграл свою роль в ослаблении опустынивания. Сравнение аэрокосмических снимков ключевого участка в северо-западной части заповедника показало, что площадь деградированных земель здесь уменьшилась с 6600 га в 1989 г. до 44 га в 2002 г. т.е. в 150 раз (Кулик и др., 2006).

Размер очага опустынивания в 2000-2004 гг. в июне составлял более сотни километров по долготе, а по широте – менее ста километров (рис.1а). По данным исследований в 2005-2008 гг. в заповеднике наблюдалось снижение дефляционных процессов, восстановление травостоя и вторичное зацелинение песчаных массивов (Федорова, 2009; Чимидов, 2009).

Второй очаг опустынивания локализуется в вытянутой с северо-запада на юго-восток депрессии, по днищу которой тянется длиной до 70 км топкий солончак Хаки-сор (рис.1а). Этот огромный голый солончак представляет собой соленую пустыню, влияние которой на окружающие земли сильно возрастает в периоды усиления засушливости климата.

Третий очаг опустынивания на стыке Красноярского и Харабалинского районов Астраханской области – результат пастбищной дигрессии. Очаг был зафиксирован в 1990-е на картах опустынивания российской части Прикаспийского региона (Борликов и др., 2000), а ключевой участок исследовался методом аэрокосмического мониторинга (Юферев, 2009).

Важно отметить, что положение нулевой изолинии, разделяющей земли с положительным и отрицательным коэффициентами корреляции, неустойчиво в течение вегетационного сезона и в межгодовом ходе. Ее неустойчивость регулируется в основном региональным климатом и в меньшей степени антропогенной нагрузкой на землю. Например, площадь очагов опустынивания сокращается в мае с одновременным снижением интенсивности опустынивания. Площадь очагов и интенсивность опустынивания повышается к концу лета и вновь начинает снижаться в сентябре.

Таким образом, независимо от применяемых методов оценок деградации засушливых земель (Виноградов и др., Методические указания..., 2009) данный подход показал свою плодотворность в объективном обнаружении очагов опустынивания не только антропогенного, но и природного происхождения.

Десятилетний период спутниковых наблюдений достаточен, чтобы проследить изменение распространения очагов опустынивания от пятилетия 2000-2004 гг. к пятилетию 2005-2010 гг. и оценить территориальные тенденции опустынивания (рис.1).

В период 2005-2009 гг. Центрально-Черноземельский очаг продолжал сокращаться (рис.1б). На рис.1б видны два оставшихся небольших очага: один на территории заповедника, а другой к северо-западу от заповедника. Слабый отрицательный коэффициент корреляции между альбедо и температурой поверхности в них свидетельствует о падении интенсивности опустынивания.

Противоположная тенденция в поведении очагов опустынивания отмечалась в Астраханской области и в западной части Казахстана (рис.1б).

На территории расширился и усилился природный очаг, порожденный солончаковой депрессией Хаки-сор. Кроме того, увеличился антропогенный очаг на стыке Красноярского и Харабалинского районов Астраханской области. Он соединился с природным очагом Хаки-сор. Одновременно произошло расширение существовавшего в 2000-2004 гг. небольшого очага в Рынских песках Казахстана. Таким образом, на данной территории в период 2005-2009 гг. по сравнению с периодом 2000-2004 гг. наблюдались условия, порождающие расширение и усиление очагов опустынивания.

О разнонаправленных тенденциях опустынивания, правобережных и левобережных земель Северо-Западного Прикаспия, в период 2005-2009 гг. по отношению к периоду 2000-2004 гг. свидетельствуют также данные об изменении NDVI-индикатора зеленой фитомассы в заданных участках Черноземельского очага опустынивания (45.5-46.5 с.ш., 46-46.5 в.д.) и Хаки-сор очага (47.5-48 с.ш., 46.5-48 в.д.) (рис.2). Сравнение показывает, что на Черных землях наблюдался заметный рост фитомассы, а в очаге Хаки-Сор – ее падение.

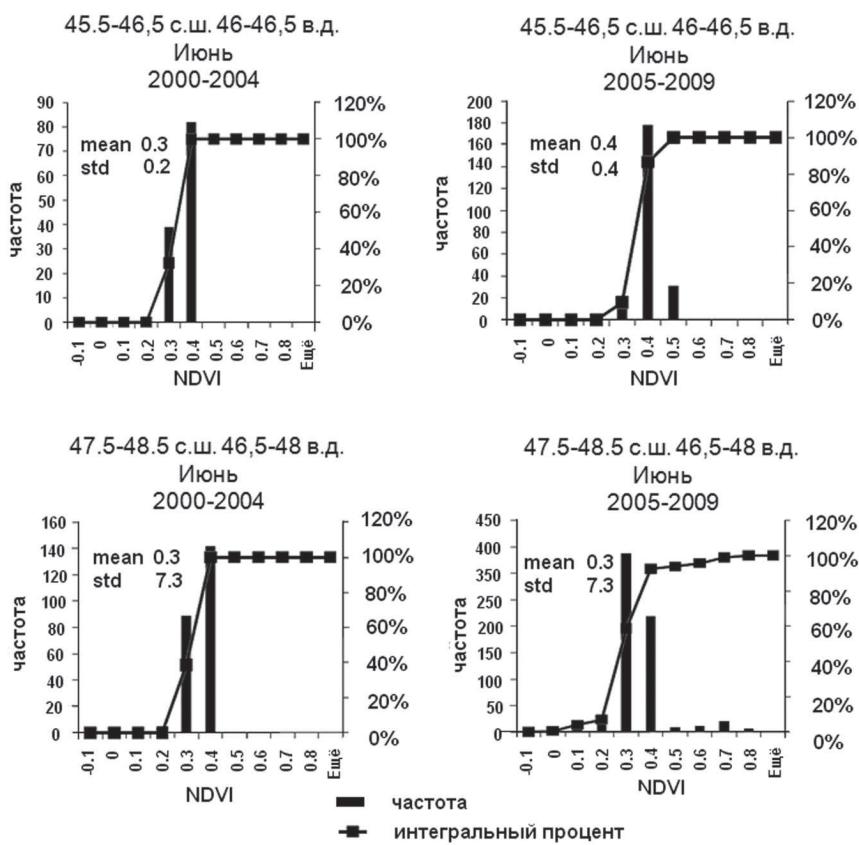


Рис.2. Гистограммы NDVI MODIS в очагах опустынивания в периоды 2000-2004 и 2005-2009 гг.:
а) Черноземельский очаг (45.5-46.5 с.ш. и 46-46.5 в.д.); б) очаг Хаки-сор (47.5-48.5 с.ш. и 46.5-48 в.д.) Июнь

Объяснение разнонаправленных тенденций опустынивания вытекает из сравнения особенностей территориального изменения NDVI-индикатора зеленой фитомассы (рис.3). Как видно из рис. 3, в период 2005-2009 гг. (июнь) NDVI увеличился на юге Калмыкии и на юге Астраханской области, где весенне-раннелетние условия вегетации были более благоприятными, чем на остальной территории. Характерно, что рост NDVI имел место в широкой полосе, огибающей Каспийское море. Максимальный рост отмечался на территории Черных земель. В то же время вне этой полосы в северной половине Калмыкии и Астрахан-

ской области, а также на территории Западного Казахстана, где весной и в начале лета было сухо, произошло падение NDVI. Увеличение засушливости климата можно рассматривать в качестве главной причины слияния разрозненных очагов в один и расширение территории опустынивания на территории Западного Казахстана.

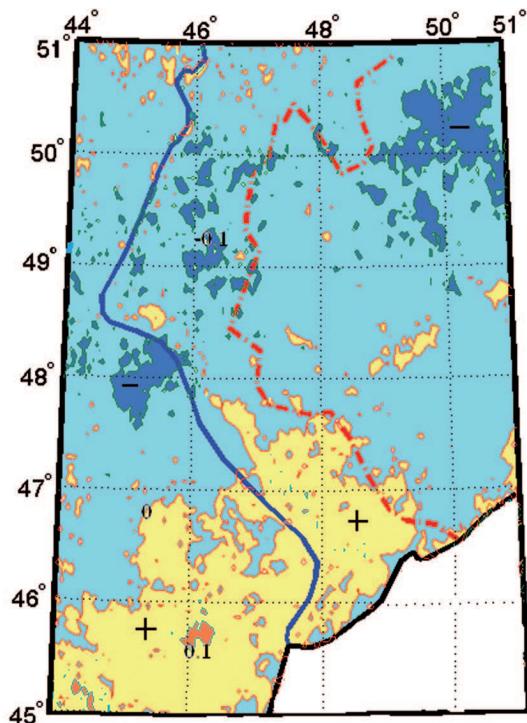


Рис.3. Изменение NDVI MODIS в Северо-Западном Прикаспии в период 2005-2009 по сравнению с периодом 2000-2004 гг. Июнь. Желтая и темно-желтая заливка –увеличение NDVI

В южной части Калмыкии фактор перевыпаса оказался слабее природных факторов, влияющих на увеличение фитомассы. В результате продолжалось сокращение площади Черноземельского очага. В то же время на юге Астраханской области фактор перевыпаса был доминирующим, что вызвало расширение существовавшего здесь очага.

Таким образом, разнонаправленные тенденции опустынивания характерны для территории Северо-Западного Прикаспия в настоящее время.

Обсуждение подхода и результатов

Рассмотренный выше подход к мониторингу опустынивания, учитывающий взаимодействие аридизации и антропогенно-природной деградации земель, может быть полезным для составления динамичных обзорных карт опустынивания. Фактически эти карты могут отражать динамику опустынивания в сезонном и межгодовом ходе, а также за многолетние периоды. Особенностью этих карт является то, что они интерактивны с климатической изменчивостью, в отличие от карт деградации земель, построенных, например, по серии аэрокосмических снимков (Виноградов и др., 1999; Методические указания..., 2009). Отметим, что региональный масштаб мониторинга опустынивания с помощью данного подхода открывает возможность выявить характерные черты пространственного развития опустынивания.

Низкое разрешение спутниковых параметров альбедо и температуры поверхности (0.05°), а также вычисление пространственной корреляции между параметрами на участке $0.5 \times 0.5^{\circ}$ ограничивает применение подхода построением мелкомасштабных и среднемасштабных карт.

Из-за высокой пространственно-временной изменчивости альбедо и температуры поверхности целесообразно строить месячные или сезонные карты, осредненные за несколько лет (в нашем случае за пять лет) и сравнивать их между собой.

Представляет интерес прямое сравнение существующих обзорных космофотокарт для некоторых районов Северо-Западного Прикаспия, построенных согласно Методическим указаниям по дистанционному эколого-экономическому мониторингу аридных пастбищ на основе ГИС-технологий (2009) с приведенными в статье картами.

Требует дальнейшего исследования вопрос об уменьшении осадков над очагами опустынивания в Прикаспии (районами с отрицательной корреляцией между альбедо и температурой поверхности). Пока есть косвенные свидетельства в пользу этого положения: по наблюдениям в 1969-1983 гг.: за пределами Черноземельского очага опустынивания было зафиксировано увеличение осадков на 20-35 мм, в северных районах до 60 мм (Воронина, 2009).

Выводы

Трактовка опустынивания как результат взаимодействия аридизации и антропогенно-природной деградации засушливых земель с обратными связями - не противоречит определению опустынивания, зафиксированному в Конвенции по борьбе с опустыниванием как деградация засушливых земель (аридных, semiаридных и сухих субгумидных) в результате действия разных факторов, включая вариации климата и деятельность человека (UNCCD, 1994). Она углубляет определение Конвенции и открывает возможность изучать это природно-антропогенное явление с учетом взаимодействующих между собой атмосферных и деградационных процессов.

Предложенный подход к объективному обнаружению очагов опустынивания не только антропогенного, но и природного происхождения, позволяет изучать их, одновременно включая разные типы опустынивания (деградация растительного покрова, ветровая эрозия, водная эрозия, засоление, подтопление и т.д.), причины опустынивания (перевыпас, нерациональное орошение и т.д.). Кроме того, становится реальностью объективная классификация опустынивания по степени его проявления (слабое, умеренное и т.д.).

Литература

1. Борликов Г.М., Харин Н.Г., Бананова В.А., Татеиши Р. Опустынивание засушливых земель Прикаспийского региона // Ростов на/Д: Изд-во СКЕЦ ВШ, 2000. 90 с.
2. Виноградов Б.В., Кулик К.Н., Сорокин А.Д., Федотов П.Б. Изодинамическое картографирование и долговременный мониторинг опустынивания и деградации земель с применением нелинейных методов моделирования // Почвоведение. 1999. №4. С.494-504.
3. Воронина В.П. Агрэкологический потенциал пастбищных экосистем Северо-западного Прикаспия в условиях меняющегося климата. Автореферат диссерт. на соискание уч. степени д.с.-х. наук. Волгоград, 2009. 49с.

4. Доскач А.Г. Природное районирование Прикаспийской полупустыни // М.: Изд-во «Наука», 1979. 142 с.
5. Золотокрылин А.Н. Климатическое опустынивание. Отв. ред. А.Н.Кренке. М.: Наука, 2003. 246 с.
6. Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В. Соотношение между климатическим и антропогенным факторами восстановления растительного покрова юго-востока Европейской России // Аридные экосистемы, 2007. Т. 13. № 33-34. С. 7-16.
7. Кулик К.Н., Юферев В.Г., Бакурова К.Б. Компьютерное моделирование динамики экологического состояния агроландшафтов на примере биосферного заповедника «Черные Земли» // Матер. IV Междунар. симпозиума / под ред. А. А. Чибилева. - Оренбург: ИПК «Газпромпечать», ООО «Оренбурггазпромсервис», 2006. С. 405-409.
8. Методические указания по дистанционному эколого-экономическому мониторингу аридных пастбищ на основе ГИС-технологий. М., ГНУ ВНИАЛМИ, 2009. 37 с.
9. Неронов В.В. Антропогенное оstepнение пустынных пастбищ северо-западной части Прикаспийской низменности // Успехи соврем. биол. 1998. Т.118. Вып.5. С.597-612.
10. Сафонова И.Н. Фитоэкологическое картографирование Северного Прикаспия // Геоботаническое Картографирование 2001-2002. С.-П., 2002. С.44-65.
11. Федорова Н.Л. Мониторинг деградированных ландшафтов биосферного заповедника «Черные Земли» с использованием материалов разновременной космической съемки // Вестник Института, №1, 2009. Институт комплексных исследований аридных территорий. Элиста. С.91-93.
12. Чимицов Т.А. Трансформация пастбищных экосистем в условиях снижения антропогенной нагрузки // Вестник Института, №1, 2009. Институт комплексных исследований аридных территорий. Элиста. С.104-107.
13. Юферев В.Г. Агролесомелиоративное картографирование и моделирование деградационных процессов на основе аэрокосмического мониторинга и геоинформационных технологий // Автореф. диссерт. на соискание докт. с.-х. наук. Волгоград, 2009.
14. UNCCD, 1994. United Nations Convention to Combat Desertification. Interim Secretariat for the Convention to Combat Desertification. Geneve Executive Center-C.P.76-1219. Geneve: Chatelaine. 71 p.

Desertification tendency in North-West Caspian region according to MODIS data

A.N. Zolotokrylin, T.B. Titkova

*Institute of Geography Russian Academy of Sciences
119017 Moscow, Staromonetny per., 29
E-mail: azolotokrylin@yandex.ru*

New approach in studying dynamics of desertification areas is proposed for the case of North West Caspian region. Desertification areas of natural and anthropogenic origin, with aridisation increased by ‘albedo - precipitation’ feedback, are identified. Difference in dynamics of desertification areas is detected by comparison data for periods 2005-2009 and 2000-2004 years. Chernozemelsky (Black Soil) area is decreased, while desertification areas in Astrakhan region and Western Kazakhstan are increased and merged.

Keywords: dry lands, desertification, aridization, degradation of land, surface albedo, surface temperature, mesoscale albedo-precipitation feedback.