



УДК 911.2(571.1):581.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА NDVI ДЛЯ МОНИТОРИНГА РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА СТЕПНОЙ ЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Н.Н. Михайлов¹**Л.А. Михайлова²****Н.Ф. Харламова²****Ч. Лхагвасурэн³***¹Белгородский государственный университет**Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85**E-mail: mikailov@bsu.edu.ru**E-mail: ludmilamik@rambler.ru**²Алтайский государственный университет**656099, г. Барнаул, ул. Ленина, д. 63**E-mail: harlatovageo@rambler.ru**³Ховдский университет**Монголия, Ховдский аймак, г. Ховд**E-mail: Hovd_Lha157@yahoo.com*

На основании анализа данных нормализованного вегетационного индекса (NDVI) за период 1982-2000 гг. построена карта распределения NDVI и его относительной изменчивости для Алтайского края. Минимальное значение индекса и его высокая абсолютная и относительная изменчивость характеризуют сухостепную территорию. На примере Кулундинской провинции показано, что преобладающим фактором, влияющим на изменение вегетационного индекса NDVI, является климатический фактор. Наблюдавшееся в 1982-2000 гг. уменьшение значений NDVI в степной зоне внутриконтинентальных районов Евразии и деградация растительного покрова (опустынивание) имеют, вероятнее всего, временный циклический характер, который может усугубиться под влиянием антропогенного пресса.

Ключевые слова: изменение климата, опустынивание, нормализованный вегетационный индекс (NDVI), степная зона, цикличность.

Введение

В свете климатических изменений, наблюдаемых в последние десятилетия, особое внимание исследователей приковано к районам степной зоны, которые представляют собой территорию потенциального риска развития процессов опустынивания [1]. Программа ООН по окружающей среде [2] и Конвенция ООН по борьбе с опустыниванием [3] определяют его как деградацию земель в засушливых, полузасушливых и сухих субгумидных районах в результате действия различных факторов, включая изменение климата и деятельность человека. Термин «земля» в данном определении означает биопродуктивную систему, включающую в себя почву, воду, растительность, прочую биомассу, а также экологические и гидрологические процессы, происходящие внутри системы. Продуктивность растительного покрова является наиболее динамичной характеристикой засушливых земель.

В результате ускоренного масштабного освоения целинных земель, увеличения температуры воздуха и циклического изменения осадков с середины XX в. началось развитие процесса опустынивания земель и на территории Алтайского края [4]. Установлено, что увеличение годовой температуры составило 1.8°C/100 лет, при этом наиболее значительное повышение температуры характерно для весеннего и зимнего сезонов, однако сопряженного увеличения продолжительности теплого и вегетационного периода не отмечается. Определено, что темпы возрастания температуры воздуха опережают темпы роста количества осадков в течение развивающейся в настоящий период внутривековой фазы повышенного увлажнения. Поэтому в пределах равнинной территории Алтайского региона усиливается засушливость климата, что проявляется в увеличении количества дней с суховеино-засушливой погодой и пыльными бурями [5]. Вместе с тем, во второй половине XX в. значительно возросла антропогенная нагрузка на природные ландшафты.

Процесс опустынивания представляет собой результат взаимодействия двух составляющих: аридизации (климатического опустынивания) и антропогенной деградации засушливых земель. Изучение соотношения и взаимодействия этих составляющих



щих – один из ключевых вопросов опустынивания [6], которые характеризуется деградацией растительного покрова, уменьшением влагозапасов в почве и т.д.

Целью данного исследования является анализ распределения вегетационного индекса на территории Алтайского края за период 1982-2000 гг. и изучение возможности использования временных рядов NDVI для мониторинга состояния растительности в районах активного земледелия степной зоны Западной Сибири. Район исследования – степная зона Алтайского края и степные участки за пределами его территории.

Для изучения распределения и динамики типов растительного покрова в глобальном и региональном масштабах применяется вегетационный индекс (NDVI) (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный относительный индекс растительности, который вычисляется по формуле:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED),$$

где: *NIR* – отражение в ближней инфракрасной области спектра; *RED* – отражение в красной области спектра. Соответственно, плотность растительности (NDVI) в определенной точке изображения равна разнице интенсивностей отраженного света в красном и инфракрасном диапазоне, деленной на сумму их интенсивностей. Анализ данных вегетационного индекса NDVI за определенный временной период позволяет сделать вывод о деградации растительного покрова или, наоборот, о процессах его восстановления.

Использовались максимальные месячные значения NDVI с разрешением 8 км, источником которых является свободно распространяемая база спутниковых данных, созданная в Годдардовском аэрокосмическом центре (DAAC) [7]. Вычислены средние значения индекса за сезон активной вегетации (май-сентябрь) для каждого из 19 лет и проанализирован ход его изменения в течение указанного временного периода. Анализ проводился с учетом климатического и физико-географического районирования территории Алтайского края [8]. Создана карта распределения среднего вегетационного индекса (NDVI) за период с 1982 по 2000 гг. на территории Алтайского края (рис. 1). Обработка материалов проводилась с использованием геоинформационной системы ArcGis9.3.

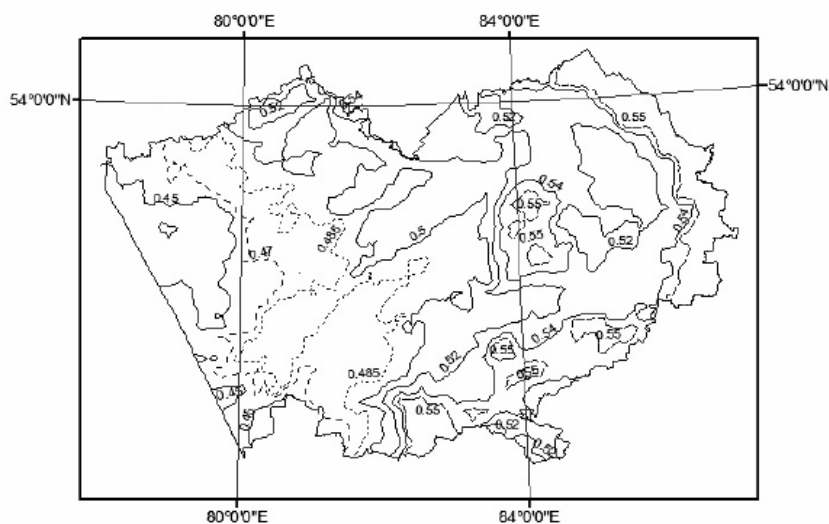


Рис. 1. Распределение среднего вегетационного индекса NDVI для Алтайского края (май–сентябрь 1982–2000 гг., пояснения в тексте)



Значения индекса NDVI возрастают в направлении с запада на восток и юго-восток в соответствии с ростом увлажненности территории. Минимальных значений (0.38) индекс достигает в центральных районах Кулундинской равнины и на юго-западе края, а максимальных (0.57) – в поясе черневых лесов Салаирского кряжа и Тигирекского хребта и на отдельных участках лесного пояса низкогорно-среднегорной зоны Алтайских гор. А.Н. Золотокрылин в своей работе обращает внимание на зональность вегетационного индекса: по его данным, изолиния индекса 0.55 близка к границе между лесостепной и лесной зонами [9]. Подобные же значения получены нами и для территории Алтайского края.

Анализ распределения вегетационного индекса и схемы физико-географического районирования юга Западной Сибири [8, 10] показал: изолиния 0.45 близка к границе Кулундинской сухостепной провинции; изолиния 0.47 отделяет сухую степь от засушливой; положение изолинии 0.485 разграничивает засушливую и умеренно-засушливую степь, а изолиния 0.55 совпадает с границей между лесостепной и лесной зонами. Незначительное смещение границ сухой и засушливой степи на восток края по сравнению со значениями, представленными в работе А.Н. Золотокрылина [9], может быть объяснено агроメリоративными мероприятиями, проводимыми сельхозпредприятиями края.

Ландшафты степной зоны Алтайского края с подзонами сухих, засушливых, умеренно-засушливых степей распространены в западной части Алтайского края в пределах Кулундинской равнины и на юге Приобского плато. Сухая степь протянулась вдоль западной границы, переходя на юго-западе в пределы Павлодарской области Казахстана. Для районов степной зоны характерна наибольшая абсолютная изменчивость вегетационного индекса, выраженная через среднеквадратическое отклонение NDVI, а также наибольшее значение относительной изменчивости вегетационного индекса – коэффициента вариации, который определяется как отношение среднеквадратического отклонения к среднему многолетнему значению вегетационного индекса и является безразмерной величиной.

Рассчитанное по данному алгоритму распределение коэффициента вариации вегетационного индекса (NDVI) представлено на рис. 2.

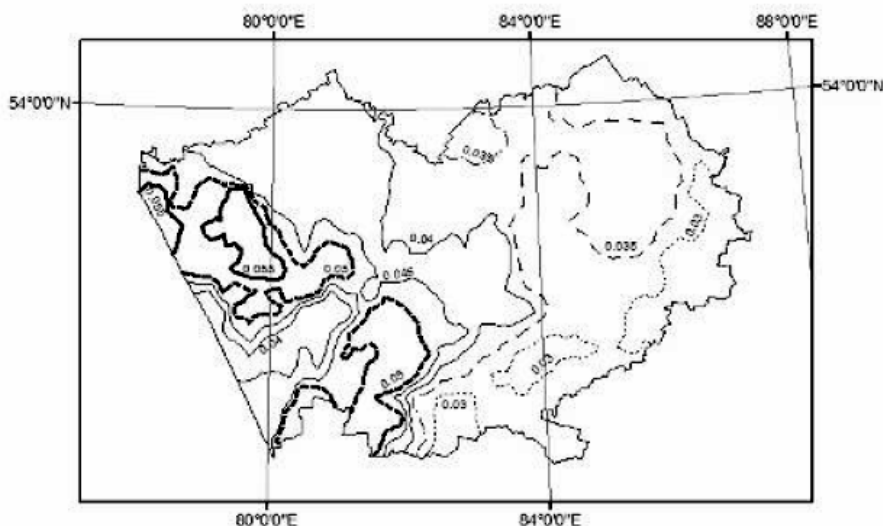


Рис. 2. Распределение коэффициента вариации вегетационного индекса (NDVI) на территории Алтайского края (май–сентябрь 1982–2000 гг.)



Наименьший коэффициент вариации NDVI (чуть больше 0.02) фиксируется для лесной зоны Алтайских гор; наибольший (0.05 и 0.06) – типичен для сухой и засушливой степи. Максимальные значения коэффициента вариации – свыше 0.7 – фиксируются для территории в районе Кулундинского озера (рис. 2). Таким образом, пространственное распределение вегетационного индекса и его изменчивости свидетельствует о том, что степная зона Алтайского края характеризуется минимальными значениями NDVI и максимальными значениями его коэффициента вариации.

Одно из самых распространенных и визуально определяемых проявлений опустынивания – деградация части растительного покрова засушливых земель, что отражается в уменьшении значений вегетационного индекса. Использование архива данных за 19-летний период позволило не только создать карты пространственного распределения NDVI, но и включить в рассмотрение третий параметр – время. Графическое представление динамики вегетационного индекса позволяет наглядно оценить изменение показателя.

Анализ полученных результатов показал, что в условиях глобальных изменений климата, которые отмечаются для земного шара, в степной зоне Алтайского края выраженной тенденции к снижению вегетационного индекса в течение 1982-2000 гг. не выявлено. Однако наблюдалось некоторое уменьшение NDVI для подзоны сухой степи Кулундинской провинции, где определено значение $NDVI < 0.45$ и коэффициент вариации $NDVI > 0.052$.

Изменение вегетационного индекса представлено на рис. 3. Максимальное значение индекса, приходящееся на 1993 г., и минимальное – в 1982 и 1997 гг., соответствуют максимальному и минимальному коэффициенту увлажнения. Эти результаты полностью совпадают с данными, характеризующими межгодовой ход аномалий NDVI на разных участках засушливых земель России, в том числе на западе Алтайского края. Максимальная положительная аномалия NDVI-индикатора, отражающая увеличение зеленой фитомассы и ослабление опустынивания, определена А.Н. Золотокрылиным для 1993 г., а отрицательная – с обратной тенденцией – для 1982, 1997 и 1998 гг. [6, с. 31-32, рис.3]. Однако уменьшения индикатора зеленой фитомассы до порогового значения $NDVI < 0.07$, свидетельствующего о климатическом опустынивании, по результатам наших исследований, на территории степной зоны Алтая в течение 1982-2000 гг. не наблюдалось. Линейный тренд свидетельствует о незначительном уменьшении вегетационного индекса в этой части Алтайского края.

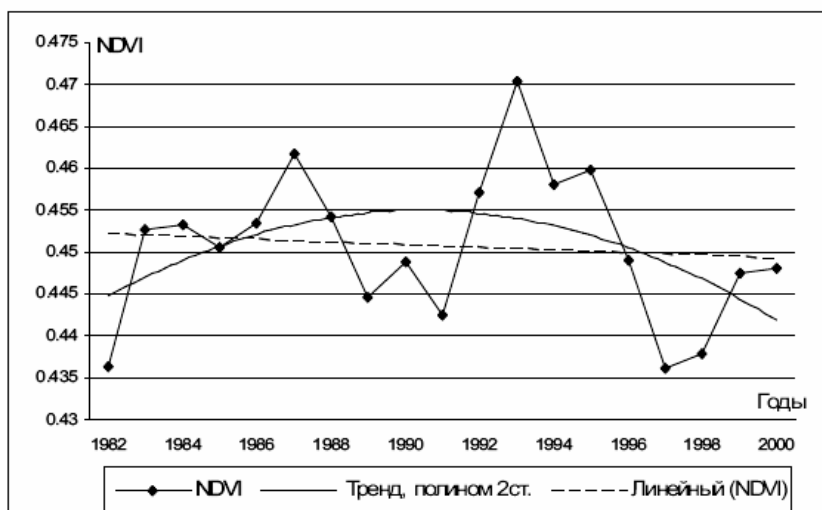


Рис. 3. Межгодовое изменение вегетационного индекса для подзоны сухой степи юга Западной Сибири



В связи тем, что северо-западная часть Алтайского края является одним из важных зерновых районов, существенным представляется определение тесноты связи между значениями вегетационного индекса, климатическими параметрами и урожайностью. Так как статистическая информация собирается в рамках границ административных образований, воспользуемся данными одного из административных районов, входящих в Кулундинскую провинцию, а именно – Славгородского. Результаты совместного анализа значений вегетационного индекса, его среднеквадратического отклонения, климатических параметров и урожайности представлены в табл. 1. Значимые коэффициенты корреляции выделены.

Таблица 1

Корреляционная матрица показателей для Славгородского района

Переменные	Т ср. за период IV-VII	Σ осадков за период IV-VII	К увл.	NDVI за период V-IX	СКО ndvi за период V-IX	Урожайность
Т ср. за период IV-VII	1,00	-0,37	-0,57	-0,54	0,16	-0,76
Σ осадков за период IV-VII		1,00	0,97	0,65	-0,37	0,50
К увл.			1,00	0,71	-0,41	0,63
NDVI за период V-IX				1,00	-0,54	0,54
СКО ndvi за период V-IX					1,00	-0,05
Урожайность						1,00

Примечание: Т ср. за период IV-VII – средняя температура за период апрель-июль; Σ осадков за период IV-VII – сумма осадков за апрель-июль; К увл. – коэффициент увлажнения Д.И. Шашко; NDVI за период V-IX – значения вегетационного индекса с мая по сентябрь; СКО ndvi за период V-IX – среднеквадратическое отклонение вегетационного индекса; урожайность – урожайность по району.

Необходимо определить соотношение погодообусловленной и антропогенной составляющей NDVI. Из табл. 1 следует, что коэффициент корреляции между NDVI и коэффициентом увлажнения Д.И. Шашко равен 0.71, а соответствующий коэффициент детерминации – 0.50, следовательно, доля дисперсии вегетационного индекса, объясняемая изменчивостью увлажнения территории, составляет 50%. Так как урожайность сельскохозяйственных культур зависит не только от климатических факторов, но и от уровня агротехнических мероприятий, целесообразно обратить внимание на взаимосвязь вегетационного индекса и урожайности. Коэффициент парной корреляции между ними составляет 0.54, соответствующий коэффициент детерминации – 0.29. На основании этих результатов можно сделать вывод, что преобладающим фактором, влияющим на изменение вегетационного индекса NDVI, является климатический фактор. Обращает на себя внимание отрицательный коэффициент корреляции между NDVI и его среднеквадратическим отклонением (-0.54), который можно интерпретировать следующим образом: чем меньше значения вегетационного индекса (сухая степь), тем более вероятна его высокая абсолютная изменчивость (неустойчивость увлажнения). Высокий коэффициент корреляции между NDVI и суммарным количеством осадков за апрель-июль (0.65) подтверждает особую значимость осадков к началу вегетационного периода.

Считается, что «наиболее целесообразно изучать климатические особенности региона применительно к естественной растительности, которая за долгий период своей эволюции прекрасно приспособилась к имеющимся природным ресурсам» [11, с. 8]. В связи с тем, что территория степей в Алтайском крае практически полностью распахана и отсутствуют участки с естественной растительностью, которые можно было бы использовать в качестве эталонных, авторами выбраны ключевые участки за пределами края: территория степного федерального заказника в Омской области; уча-



сток Чуйской степи (горной) на высоте около 1900 м; участок степи на территории Убсунурской котловины (1700 м); участок степи в Зайсанской котловине (400 м). Ключевые участки определялись по картографическим материалам и спутниковым снимкам, представленным на сайте Google Earth. Изменчивость вегетационного индекса для территории исследования в пределах Алтайского края и ключевых участков представлена на рис. 4.

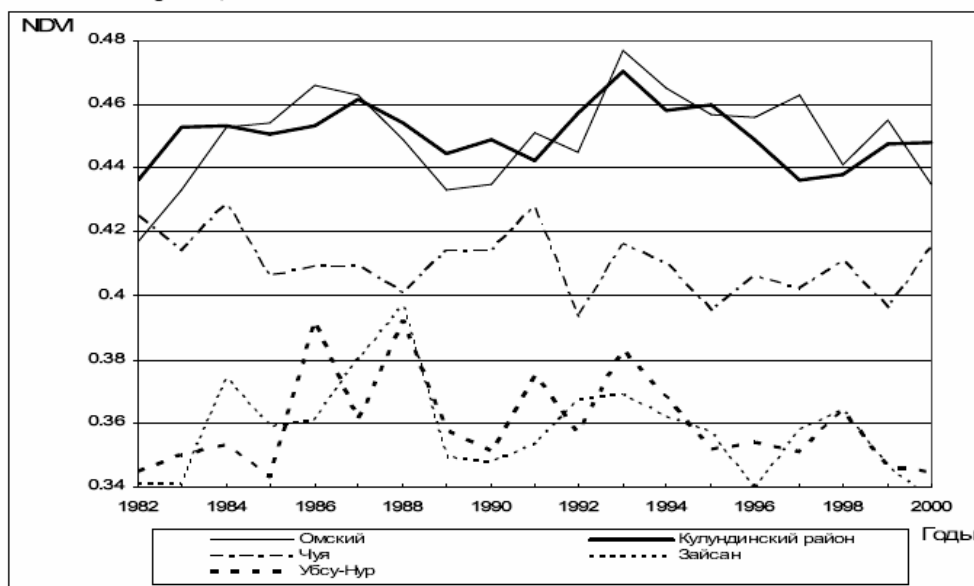


Рис. 4. Межгодовая изменчивость вегетационного индекса для Кулундинской провинции и ключевых участков, май-сентябрь

Для выделения тренда использовался один из методов программы Statistica – фильтр 4253Н – сочетание алгоритма скользящего среднего и медианного сглаживания [12]. Результаты исследования представлены на рис. 5.

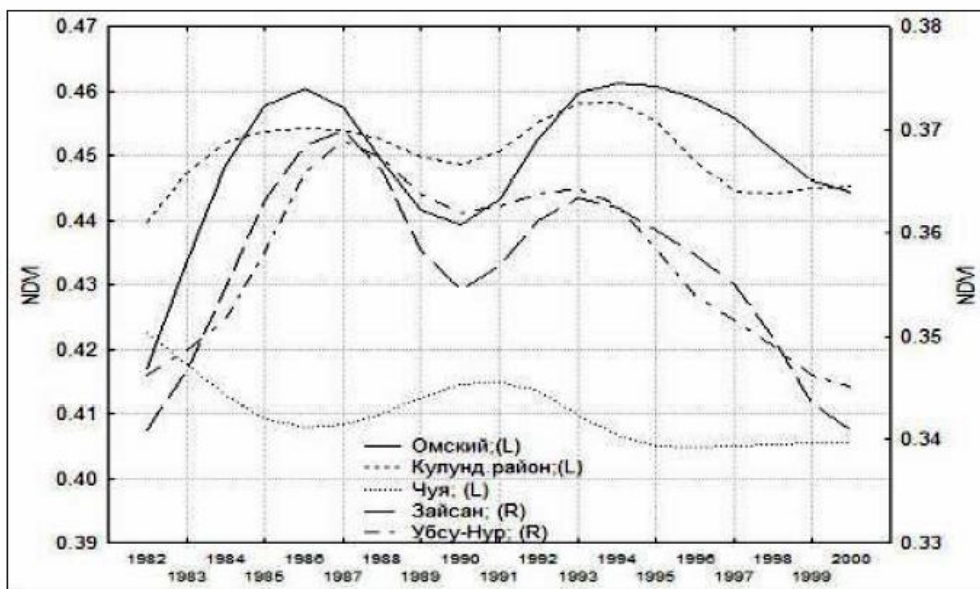


Рис. 5. Сглаженные ряды вегетационного индекса по Кулундинской сухостепной провинции и ключевым участкам



Сопоставление полученных трендов отчетливо демонстрирует синхронность изменений вегетационного индекса равнинной степи и степных участков межгорных котловин, обусловленную единством атмосферной циркуляции. Несколько обособленно выглядит тренд для Чуйской степи, подчеркивая исключительные климатические условия, складывающиеся в горных высокоприподнятых котловинах. Наибольшая теснота связи определяется с данными по Кулундинскому участку и Омскому степному заказнику ($r = 0.58$); в меньшей степени – с данными по Зайсанской степи ($r = 0.44$). Коэффициенты корреляции для ключевых участков приведены в табл. 2, где значимые коэффициенты выделены.

Таблица 2

Матрица парных коэффициентов корреляции ключевых участков

	Ключевые участки				
	Кулундинский	Омский	Чуя	Зайсан	Убсу-Нур
Кулундинский	1,00	0,58	-0,22	0,44	0,36
Омский		1,00	-0,29	0,46	0,47
Чуя			1,00	-0,17	0,04
Зайсан				1,00	0,61
Убсу-Нур					1,00

Использование приемов сглаживания позволило выявить реально существующие тренды в анализируемых рядах данных. Для определения тенденции происходящих изменений в сухостепных районах Алтайского края подробно рассмотрен временной ряд, соответствующий вегетационному индексу подзоны сухой степи Кулундинской провинции. На графике автокорреляционной функции данного ряда определяются выбросы на лагах 4 и 11; однако недостаточная длина ряда не позволяет делать выводы о значимости 11-летнего периода. Оценка частной автокорреляционной функции также подтверждает наличие выброса только на лаге 4 (модель авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего). Автокорреляционная функция остатков свидетельствует об адекватности модели, гистограмма распределения остатков близка к нормальной [13]. Идентифицируем изучаемый ряд моделью с одним параметром авторегрессии и циклической компонентой с лагом 4. На рис. 6 представлены значения вегетационного индекса по Кулундинской провинции, прогноз по модели АПРС и 90% – доверительные границы для прогноза.

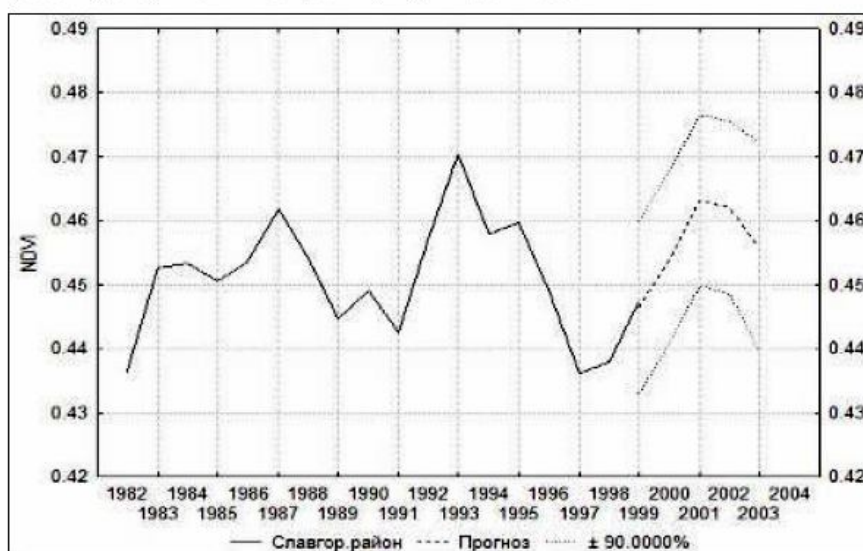


Рис. 6. Изменение вегетационного индекса для территории Кулундинской провинции и краткосрочный прогноз



Анализ характера временной тенденции вегетационного индекса подтверждает предположение о том, что данному ряду, как и многим другим природным процессам, присуще наличие циклической компоненты. Несмотря на некоторое уменьшение вегетационного индекса для Кулунды, определенное линейным трендом 1982-2000 гг., вероятно дальнейшее его увеличение при сохранении современной антропогенной нагрузки в соответствии с рассчитанным прогнозом на ближайшее десятилетие.

В результате проделанной работы на основании анализа данных нормализованного вегетационного индекса (NDVI) за период 1982-2000 гг. построена карта распределения NDVI и его относительной изменчивости для Алтайского края. Минимальные значения индекса и его максимальная абсолютная и относительная изменчивость характеризуют сухостепную территорию. Динамика изменений вегетационного индекса в наиболее засушливых районах Алтайского края (на примере Кулундинской провинции), являющихся районами активного земледелия, сопоставлена с районами степной зоны с преобладанием естественной растительности. Несмотря на имеющиеся различия, связанные с физико-географическими особенностями расположения конкретных ключевых участков, в целом просматривается единая тенденция в изменении растительного покрова субрегиона.

Определена теснота связи значений NDVI с различными климатическими параметрами и урожайностью, а также с другими ключевыми участками. Показано, что преобладающим фактором, влияющим на изменение вегетационного индекса NDVI, является климатический фактор.

Учитывая прогноз, составленный на основе параметров авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего (АПСС), а также установленные взаимосвязи между различными факторами (табл. 1), предполагается увеличение вегетационного индекса для сухостепных районов Алтая в пределах цикла повышенного увлажнения, что подтверждается данными по урожайности за 2001-2003 гг., с последующим его снижением.

Таким образом, наблюдавшееся в 1982-2000 гг. снижение значений NDVI в степной зоне внутриконтинентальных районов Евразии и деградация растительного покрова (опустынивание) имеют, вероятнее всего, временный циклический характер, который может усугубиться под влиянием антропогенного пресса.

Изучение распределения вегетационного индекса по Алтайскому краю и ключевым участкам с естественной степной растительностью показало целесообразность использования временных рядов NDVI для воспроизведения динамики состояния растительного покрова в сельскохозяйственных районах.

Список литературы

1. Опустынивание засушливых земель России: новые аспекты анализа, результаты, проблемы / отв. ред. акад. В.М. Котляков. – М., 2009. – 298 с.
2. United Nations. Managing fragile ecosystems: Combating desertifications and drought. Chapt.12 of Agenda 21. Pt.2. N.Y. United Nations, 1992.
3. CCD. United Nations Convention to Combat Desertification. In those Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, particularly in Africa // Interim Secretariat for the Convention to Combat Desertification. Geneva Execute Center-C.P.76-1219. Chatelaine/Geneve, 1994. – 71 p.
4. Харламова Н.Ф. Тенденции изменения современного климата в бассейне Верхней Оби // Экологический анализ региона (теория, методы, практика): сб. науч. трудов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – С. 143-148.
5. Харламова Н.Ф. Некоторые особенности климатических изменений для внутриконтинентальных районов России // Тез. стендовых докл. междунар. конф. по пробл. гидрометеорологической безопасности (прогнозирование и адаптация общества к экстремальным климатическим изменениям). – М.: Триада ЛТД, 2006. – С. 68.
6. Золотокрылин А.Н. Климат и опустынивание засушливых земель России // Известия РАН. Серия: География. – 2008. – Вып. 2. – С. 27-53.



7. DAAS: Distributed active archive center. Pathfinder AVHRR land data // <http://daac.gsfc.nasa.gov/>
8. Атлас Алтайского края. – М.; Барнаул, 1978. – Т. 1. – 222 с.
9. Золотокрылин А.Н. Климатическое опустынивание. – М.: Наука, 2003. – 246 с.
10. Винокуров Ю.И., Цимбалеи Ю.М. Региональная ландшафтная структура Сибири. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2006. – 96 с.
11. Береснева И.А. Климаты аридной зоны Азии. – М.: Наука, 2006. – 287 с.
12. Боровиков В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов. – СПб.: Питер, 2003. – 688 с.
13. Боровиков В.П. Прогнозирование в системе STATISTICA в среде Windows: Основы теории и интенсивная практика на компьютере: учеб. пособие. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 368 с.

THE USAGE OF TEMPORAL ROWS OF THE VEGETATION INDEX NDVI FOR THE MONITORING OF STEPPE ZONE PLANT COVER IN THE WESTERN SIBERIA

N.N. Mikhailov¹

L.A. Mikhailova²

N.F. Kharlamova²

Ch. Lhagvasuren³

¹Belgorod State University

Pobedy St., 85, Belgorod, 308015,
Russia

E-mail: mikhailov@bsu.edu.ru

E-mail: ludmilamik@rambler.ru

²Altay State University

Lenina St., 63, Barnaul, 656090, Russia

E-mail: harlamovageo@rambler.ru

³Hovd State University

Hovd Aymak, Mongolia

E-mail: Hovd_Lha157@yahoo.com

On the basis of analysis of data of the normalised vegetative index (NDVI) during 1982-2000 the map of allocation NDVI and its relative variability for Altay territory is constructed. The minimum value of an index both its high absolute and relative variability characterise arid-steppe terrain. On an example of the Kulundinskaya province it is shown, that by the prevailing factor influencing change of vegetative index NDVI, climatic factor is. Reduction of values NDVI observed in 1982-2000 in steppe region midland areas of Eurasia and degradation of a plant cover (desertification) have, most likely, temporary cyclic character which can be aggravated under the influence of an anthropogenic press.

Key words: climate change, desertification, normalized vegetation index (NDVI), steppe zone, temporal.