

# Анализ многолетних рядов NOAA/AVHRR/NDVI и гидрометрических условий южной части Казахского мелкосопочника

П.А. Пропастин<sup>1</sup>, Н.Р. Муратова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geography, Georg-August University  
Goldschmidtstrasse, 5, 37075, Goettingen, Germany*

*E-mail: ppavel@gmx.de*

<sup>2</sup>*Институт космических исследований МОН Республики Казахстан  
050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 15*

*E-mail: nmuratova@rambler.ru*

Проанализирована зависимость условий вегетации от климатических компонент для центральной части Карагандинской области. Исходными данными являлись декадные индексы NOAA/AVHRR/NDVI 8x8 км за период 1985-2001 и данные 9 метеостанций. Эмпирические зависимости между состоянием растительности и метеоусловиями получены путем расчета автокорреляционных коэффициентов и уравнений линейной регрессии в сезонном и межсезонном многолетнем циклах. Показана вариативность параметров регрессионных уравнений и степени корреляционной связи в пространстве и времени. В 16-ти летнем цикле выявлена тесная положительная корреляционная связь между усредненными NDVI за вегетационный период и суммами осадков. Наиболее высокие показатели ( $r = 0,6-0,9$ ) характерны для степной и полупустынной зоны. Причем суммирование осадков за 2-3 предшествующих года увеличивает коэффициент корреляции. Высокая степень зависимости обнаружена также для усредненного весеннего NDVI и средней весенней температуры ( $r = 0,6-0,8$ ). Зависимость между суммарными летними осадками и усредненным NDVI за июнь-август несколько ниже, но также статистически достоверна ( $r = 0,48-0,55$ ). Анализ данных внутри вегетационного периода (апрель – октябрь) также выявил наличие зависимости NDVI от хода температуры ( $r = 0,7-0,8$ ) и осадков ( $r = 0,6-0,75$ ). Для полупустынных и степных районов наблюдается 3-4-х недельное отставание пика NDVI от пика осадков. Предложен новый метод количественной оценки опасности деградации для каждого пикселя, основанный на рассчитанных регрессионных уравнениях. Для каждого пикселя на каждый сезон рассчитаны отклонения от регрессионной прямой и затем тренд отклонения в многолетнем ходе. Отрицательный уклон тренда указывает на деградационные процессы. По знаку и величине уклона тренда произведена оценка опасности деградирования и составлена карта для региона исследования.

## Введение

Для эффективного управления растительными ресурсами и моделирования биосферных процессов необходимо знать степень влияния внешних факторов на историческую динамику растительности, самыми важными из которых являются климат и антропогенное воздействие. Растительный покров, являясь наиболее динамичным компонентом, чутко реагирует на современные изменения глобального климата, исследования двадцатилетней динамики условий вегетации выявили значительные изменения состояния растительности с 1981 года, которые проявляются как в увеличении продуктивности растительного покрова, так и в удлинении вегетационного периода. Доказана тесная связь между увеличением зимних и весенних температур и положительным трендом условий вегетации за двадцатилетний период на глобальном [1, 2, 3] и региональном [4] уровнях.

Вторым важнейшим фактором, обуславливающим межгодовую динамику условий вегетации в аридных регионах, является фактор осадков. Отмечается тесная зависимость между величиной межгодовой вариативности осадков и степенью их влияния на динамику растительного покрова: наибольшую чувствительность к колебаниям осадков проявляет растительный покров тех регионов, где эти колебания имеют амплитуду минимум 25-30% от средней многолетней суммы.

Кроме знаний о многолетней динамике условий вегетации и ее зависимости от динамики климатических факторов, важна также информация о влиянии погодных компонент на растительность во внутрисезонном вегетационном цикле. Опубликованные исследования демонстрируют тесную коррелятивную зависимость между ходом условий вегетации и ходом гидротермического фактора внутри периода вегетации [5, 6, 7, 8]. Наиболее высокие коэффициенты корреляции достигаются при

использовании в расчетах месячных значений переменных [9, 10], для декадных, двухнедельных и двухдекадных значений корреляционная связь несколько слабее.

В данном исследовании была предпринята попытка выявить силу влияния гидротермического компонента на динамику растительного покрова южной части Казахского мелкосопочника. В качестве переменных, определяющих многолетний тренд и динамику состояния вегетации, выступали декадные суммы осадков и декадные средние температуры за период 1985-2000. Как общий показатель вегетационной активности был взят декадный NDVI. Была просчитана статистическая взаимосвязь между временными сериями NDVI и гидротермического компонента для всего 16-ти летнего цикла и в отдельности для внутрисезонного цикла вегетации, продолжающегося с апреля по октябрь.

### **Характеристика района исследования**

Регион исследования располагается между 46°-50° с.ш. и 72°-75° в.д. и включает в себя центральную часть Карагандинской области. Южной границей служит береговая линия озера Балхаш, северная граница региона исследования проходит по Казахскому мелкосопочнику – своеобразной природной части низких островных гор и холмов, возвышающихся над поверхностями денудационных и аккумулятивных равнин. Климат региона сухой резкоконтинентальный, среднее количество осадков изменяется от 100 мм на юге региона исследования до 280 мм на севере, но наблюдаются высокие колебания в межгодовом цикле: от 20 до 30 %. Средняя годовая температура равна 0 - 1,5°С, при этом амплитуда температур составляет 40 – 50°С.

Территория района исследования принадлежит в плане физико-географического районирования к зоне сухих степей, пустынь и полупустынь. Приобладающим типом почв в зоне сухих степей и пустынь являются светло-каштановые и каштановые, в пустыне почвенный покров развит слабо и представлен в основном щебнистыми, солончаковыми и кое-где глинистыми пустынными почвами. Растительный покров очень неоднороден, зональным типом является разнотравно-злаковая в комплексе с кустарниками в северной части и псаммофитные полукустарнички, карликовые полукустарнички в комплексе с низкими ксерофитными травами на юге. В сухостепной зоне распространены такие вегетационные комплексы как холоднопопынно-злаковый, белопопынно-типчаково-ковыльный, холоднопопынно-типчаковый в сочетании с красноковыльно-кустарниковым, разнотравно-овседово-типчаковый. В пустыне преобладают вегетационные комплексы, в которых сочетаются разные виды полыни, джужгун и терескен. Растительный покров полупустыни сформирован ксерофильными видами злаков и полукустарничков, причем при движении с юга на север доля полукустарничков уменьшается, а доля злаков возрастает. Широко представлены эфемеры и однолетние. Области, занятые солончаками и солончаковыми почвами, почти лишены растительности. Здесь встречаются лишь отдельные экземпляры галофитов и супергалофитов, таких как биюргун, карабарак и сарсазан.

Таким образом, вегетационные комплексы пустыни, полупустыни и сухой степи являются тремя основными типами подстилающей поверхности в регионе исследования и, как показал ход нашей работы, четко разделяются по динамике во внутрисезонном вегетационном цикле и по степени обусловленности этой динамики климатическими факторами. Исходя из этого, наш анализ динамики вегетационных условий базировался на естественном физико-географическом делении региона, вычленении и усреднении данных NDVI и метеостанций на три основных типа растительного покрова. Для демонстрации неоднородности внутри типа покрытия мы также провели расчеты для каждого отдельного пикселя.

### **Спутниковые и климатические данные**

С 1981 года NOAA проводит ежедневный глобальный мониторинг состояния растительности земной поверхности. Нормализованный дифференциальный вегетационный индекс NDVI, получаемый на базе спутниковых данных NOAA/AVHRR, рассчитывается из разницы рефлексии в 1 и 2 канале и имеет

пространственное расширение 8 или 16 километров. Низкое пространственное и высокое временное расширение позволяет охватывать обширные площади и извлекать максимум информации для анализа динамики растительного покрова. Труднопереоценимым качеством архива данных NOAA/AVHRR является свободный бесплатный доступ к нему через сеть интернета. В данном исследовании мы использовали декадные индексы NOAA/AVHRR NDVI с разрешением 8x8 км за период 1985-2000. Составленный банк данных включает в себя 336 декад вегетационного сезона (с апреля по октябрь) для каждого года из периода исследования.

Данные по метеорологическим станциям, расположенным в районе исследования, были получены из КазГидроМета и имели аналогичное временное разрешение – 10 дней. Данные включали средние декадные значения температур и суммы 10-дневных осадков для каждого вегетационного сезона за период 1985-2004 годы. Таким образом, к банку данных NOAA/AVHRR NDVI были присовокуплены данные 9 метеостанций за аналогичный период времени.

### **Приведение данных в рабочее состояние**

Необходимым этапом, предшествующим тематическому анализу данных, является их предварительная обработка, включающая в себя приведение спутниковых данных в рабочее состояние и оцифровка данных метеостанций.

Технология обработки временных серий NOAA NDVI предусматривает несколько уровней. После загрузки данных из Интернета осуществляется их геометрическая и радиометрическая нормализация, отбор безоблачных фрагментов, географическая привязка и преобразование в заданную картографическую проекцию.

Набор процедур геометрической нормализации включал линейаризацию данных, внесение поправки на рельеф и ряд других операций.

Радиометрическая калибровка необходима из-за ухудшения состояния датчиков AVHRR при длительной эксплуатации и для устранения проблемных зон во временных сериях, появляющихся при переходе с одного типа спутников на другой. В данном исследовании был применен принцип эквивалентного альбедо [11]. В качестве эталонных участков выступали две поверхности с однородным покрытием в Сахаре и Аравийской пустыне. По результатам наблюдений вычислены калибровочные коэффициенты, которые затем применены на временные серии NDVI.

Необходимость атмосферной коррекции обусловлена искажением сигнала из-за поглощения и рассеяния электромагнитного излучения в атмосфере облаками. Эта проблема частично преодолена при выборе максимальных значений для каждого пикселя исследуемой территории за 10 дней. Оставшиеся искажения были удалены при обработке медиальным фильтром или при вычислении среднего значения для соседних декад.

Географическая привязка заключалась в привязке к топоосновам. Все данные были преобразованы в географическую проекцию.

Первичная обработка данных осадков и температуры включала в себя устранение пробелов в статистике и получение декадных цифровых карт этих переменных на весь период исследования. После устранения пробелов в статистике, цифровые карты с разрешением, равным NOAA AVHRR NDVI были произведены пакетом программ Surfer 8. Способ интерполяции – простой крикинг. Затем полученные временные серии цифровых карт были привязаны к базовым топоосновам и переведены в географическую проекцию.

### **Методы анализа**

В данном исследовании были проанализированы зависимости межгодовой и внутригодовой динамики условий вегетации от гидротермического фактора. Для этого были сопоставлены ряды NDVI и осадков, NDVI и температур и вычислена теснота корреляционной связи между ними. Это было сделано путем расчета линейных корреляционных коэффициентов и уравнений линейной регрессии между данными

рядами, в которых NDVI выступал как зависимая переменная. Для оценки надежности коэффициента корреляции применялся критерий Фишера.

#### *Анализ многолетней динамики*

Для анализа межгодовой динамики и зависимости ее от климатических факторов были сопоставлены ряды значений NDVI, усредненных для каждого вегетационного периода, с рядами осадков, суммированных за апрель-май для каждого года, и с рядами усредненных температур. Коэффициенты корреляции между рядами рассчитывались с доверительной вероятностью  $\beta = 0,95$ . Для определения тесноты связи между многолетней динамикой сезонных условий вегетации и сезонных климатических условий, расчеты проводились также для среднесезонных значений переменных (весна, лето, осень).

Мы попробовали выяснить, насколько сильно влияние осадков, выпавших в предыдущие годы, на текущие условия вегетации. Для этого были составлены ряды из осадков, суммированных за несколько лет, от 2 до 4. Увеличение коэффициента корреляции, рассчитанного между рядами аккумулярованных осадков и рядами NDVI, служит сигналом того, что осадки предыдущих лет оказывают влияние на текущую динамику растительного покрова.

#### *Анализ связи внутри периода вегетации*

Для анализа корреляционных связей внутри растительного сезона сопоставлялись ряды декадных значений NDVI с рядами декадных сумм осадков и средних декадных температур. Для этого было рассчитано среднее значение каждой из трех переменных для каждой декады (с 1-ой по 21-ую) вегетационного сезона за период 1985-2000.

Подобные исследования, проведенные в различных регионах земного шара, указывают на наличие асинхронности между внутригодовым ходом NDVI и ходом осадков [5, 7, 8, 9]. Асинхронность составляет от 1 до 12 декад, и выражается в запаздывании пика NDVI после пика осадков. Причиной ее является замедленная чувствительность растительности на осадков, зависящая от скорости биохимических процессов в самих растениях и в почвенном покрове, а также от способности почвы ассимилировать влагу. Для выявления феномена асинхронности расчеты проводились с рядами, сдвинутыми от 1 до 6 декад по отношению к друг к другу.

## **Результаты**

#### *Межгодовая динамика*

Анализ динамики NDVI и гидротермического фактора в 16-ти летнем цикле выявил тесную корреляционную зависимость между этими переменными (Рисунок 1). Причем если корреляция NDVI с осадками и с весенними температурами положительная (Рисунок 2), то корреляция NDVI со средними температурами за вегетационный период отрицательная. При расчетах тесноты связи между NDVI и осадками наиболее высокие коэффициенты корреляции наблюдаются для рядов, включающих усредненные значения NDVI за вегетационный период и суммы осадков за апрель-октябрь. Усредненные летние и осенние величины дают несколько меньшие коэффициенты корреляции, тогда как между рядами средних осенних значений корреляция отрицательна и теснота наблюдаемой связи очень низка. Теснота корреляционной связи зависит от типа вегетационного покрытия: самые высокие коэффициенты корреляции показывает степная растительность ( $r = 0,74$  для всего периода вегетации,  $r = 0,54$  для лета и  $r = 0,48$  для весны), в то время как пустынная растительность – самые низкие ( $r = 0,57$ ;  $r = 0,55$  и  $r = 0,41$  соответственно), полупустынная занимает промежуточное положение (Таблица 1, Рисунок 4а).

Корреляционная связь между рядами NDVI и температуры имеет отрицательный знак для летних величин, усредненных на весь вегетационный период, и положительный знак для весеннего и осеннего сезонов (Таблица 2, Рисунок 4б).

Причем, если для осени коэффициенты корреляции очень низки ( $r = 0,17-0,20$ ), то для весны они лежат в пределах  $r = 0,62-0,85$  и превышают таковые, рассчитанные для корреляционной связи между NDVI и осадками.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между рядами среднего NDVI для всего периода вегетации и отдельных сезонов и рядами соответствующих сумм осадков на период 1985-2000

Тип вегетации	Коэффициент корреляции между NDVI и осадками			
	Период вегетации	Весна	Лето	Осень
Вся степь	0,74	0,54	0,69	-0,17
Вся полупустыня	0,64	0,48	0,54	-0,15
Вся пустыня	0,57	0,41	0,55	-0,20
Все пиксели	0,65	0,51	0,61	-0,18

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между рядами среднего NDVI для всего периода вегетации и отдельных сезонов и соответствующими рядами средней температуры на период 1985-2000

Тип вегетации	Коэффициент корреляции между NDVI и температурой			
	Период вегетации	Весна	Лето	Осень
Вся степь	-0,65	0,81	-0,51	0,17
Вся полупустыня	-0,49	0,80	-0,38	0,15
Вся пустыня	-0,38	0,62	-0,22	0,20
Все пиксели	-0,22	0,78	-0,44	0,18

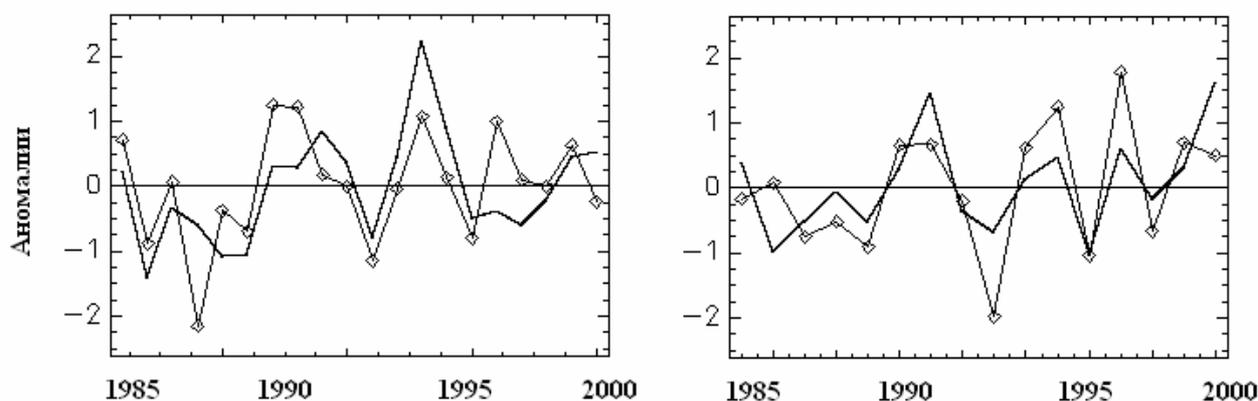


Рис. 1. Динамика аномалий средних весенних NDVI и температур (слева), средних NDVI и осадков за период вегетации (справа) в течение 1985-2000. Аномалии вычислены в единицах стандартного отклонения и усреднены на весь регион. Жирная линия – NDVI, линия со значком – климатические компоненты

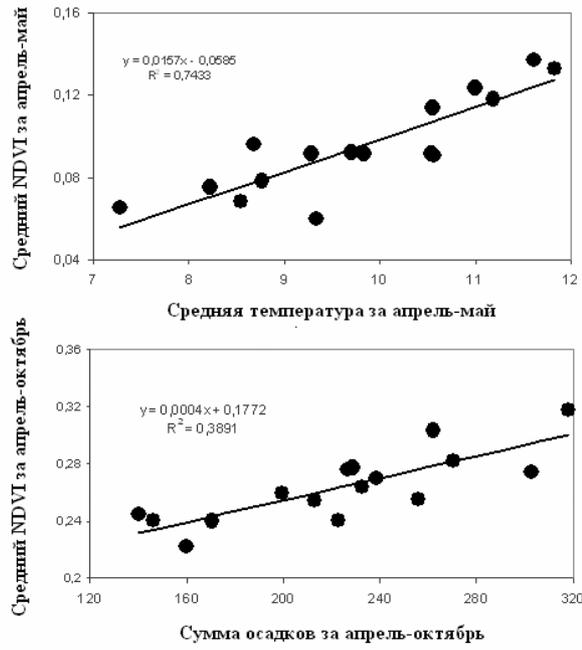


Рис. 2. Графики регрессии между временными сериями среднего весеннего NDVI и средней весенней температуры (вверху), среднего NDVI и суммами осадков за период вегетации (внизу)

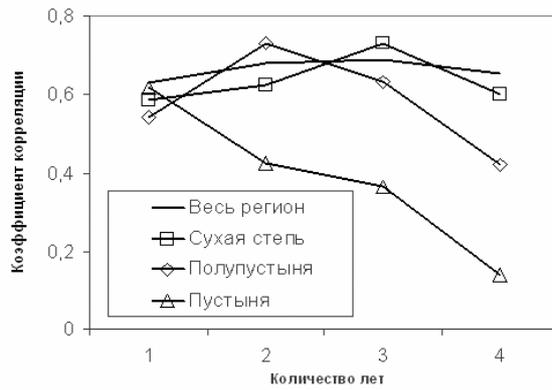


Рис. 3. Зависимость коэффицента корреляции от количества накопленных осадков

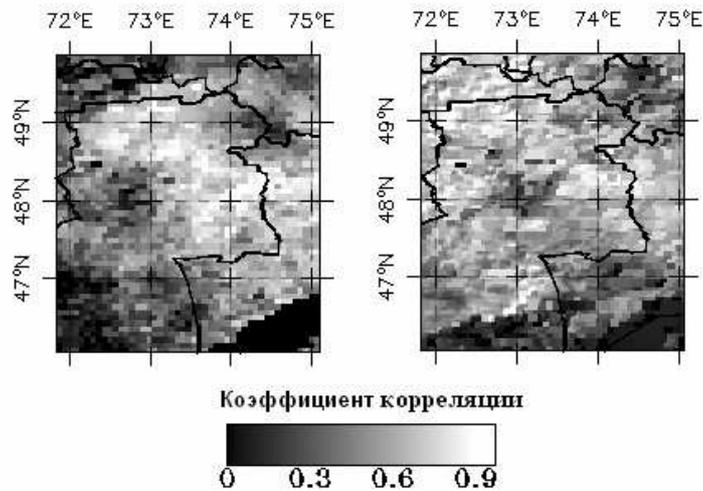


Рис. 4. Кoeffициент корреляции между временными сериями среднего весеннего NDVI и средней весенней температуры (слева), среднего NDVI и суммами осадков за период вегетации (справа), вычисленные для каждого пикселя

### Внутрисезонная динамика

Анализ декадных данных внутри вегетационного периода выявил наличие корреляционной зависимости NDVI от хода температуры и осадков. В обоих случаях корреляция положительна и теснота связи зависит от типа растительности (Рисунок 5). Как и в межгодовой динамике, степная растительность обнаруживает наиболее высокие коэффициенты корреляции ( $r = 0,71$  и  $r = 0,84$ ), для пустынной растительности они самые низкие ( $r = 0,51$  и  $r = 0,63$ ). Ход декадных значений NDVI синхронен ходу температуры для всех типов растительности. Однако наблюдается асинхронность между динамикой NDVI и осадков. Разница между ходом NDVI и ходом осадков увеличивается от пустыни (0-0,5 декад) к степи (2-3 декады) и зависит, вероятно, от представленности многолетних трав и злаков в растительном покрове: чем больше их доля, тем значительнее асинхронность (Рисунок 6).

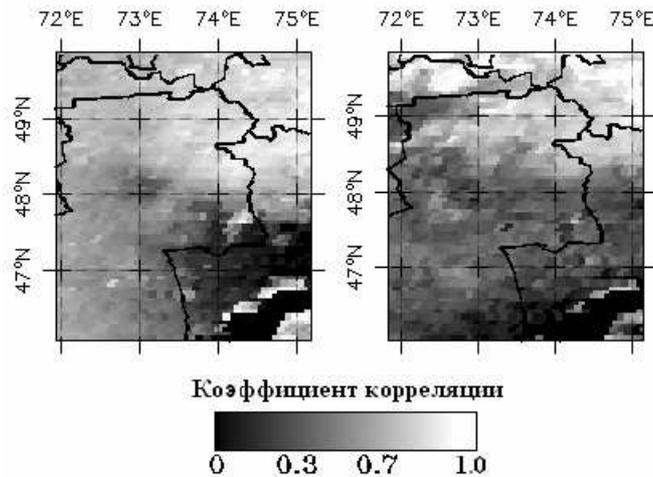


Рис. 5. Коэффициент корреляции между сериями декадных значений NDVI и гидротермического фактора внутри периода вегетации, вычисленный для каждого пикселя: NDVI и температура (слева), NDVI и осадки (справа)

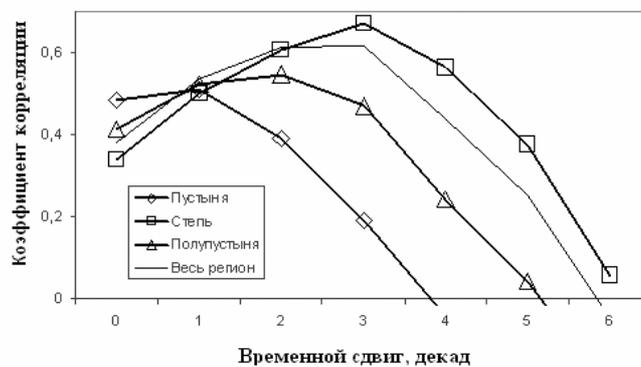


Рис. 6. Зависимость коэффициента корреляции между временными сериями декадных NDVI и декадных сумм осадков внутри периода вегетации от временного сдвига (декады) для основных типов покрытия

### Модель выявления очагов деградации растительного покрова

В виду того, что динамика растительного покрова в многолетнем цикле тесно связана с динамикой гидротермического фактора, любой временной тренд NDVI обусловлен прежде всего трендом климатических переменных. Представляется возможным устранить климатическую компоненту из тренда NDVI и таким образом определить компоненту, не связанную с гидрометрическим фактором. Эта компонента будет отражать изменение состояния растительности в результате внешних воздействий, главным образом антропологического характера [4, 13].

Выше было количественно определено влияние гидротермического фактора на межгодовую динамику условий вегетации в 16-тилетнем цикле путем расчета коэффициента корреляции и уравнений регрессии для каждого пикселя в регионе исследования. Эмпирическая линия регрессии, определяемая уравнением, описывает ожидаемые значения NDVI для разных сумм осадков. Однако фактические значения NDVI отклоняются от линии регрессии по той причине, что в данный пункт времени условия вегетации отличаются от расчетно-теоретических. Если предположить, что теоретические значения NDVI, соответствующие каждому интервалу гидрометрического фактора представляют собой продукт климатической компоненты, то для ее устранения необходимо вычислить отклонения фактических значений от найденных теоретических. Это было сделано для каждого пикселя и каждого года периода исследования. Таким образом, мы получили временные серии антропогенной компоненты на период 1985-2000 гг. Для индикации очагов деградации вегетационного покрова необходимо было проследить тренд отклонения фактических значений от расчетных теоретических; негативные значения тренда будут указывать на уменьшение восприимчивости растительного покрова к гидротермическому фактору и, следовательно, на происходящие процессы деградации. После расчета трендов неклиматической компоненты выявились области негативных значений, индицирующие очаги деградации растительного покрова (Рисунок 7).

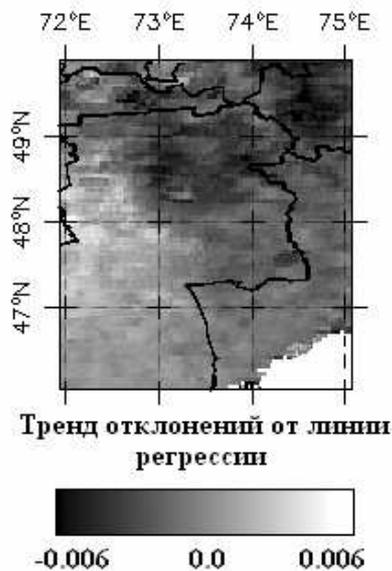


Рис. 7. Временной тренд (1985-2000 гг.) отклонений фактических значений NDVI от найденных теоретических. Отрицательные значения тренда указывают на ухудшение условий вегетации. Области низких отрицательных значений представляют собой очаги деградации растительного покрова

### Заключение

Данное исследование имело целью изучение зависимости динамики условий вегетации от климатических факторов (осадки и температуры) в аридно-семи-аридном регионе Центрального Казахстана. Результаты работы доказывают наличие тесной взаимосвязи между условиями вегетации и гидротермического фактора, как в межгодовом 16-ти летнем цикле, так и внутри периода вегетации. Теснота корреляционной зависимости, рассчитанная для временных серий NDVI и гидротермического фактора, примерно соответствуют таковой, полученной для других аридных и семиаридных регионов [4, 5, 9]. Установленная корреляционная зависимость варьируется между типами растительного покрова и возрастает от пустыни к степи.

Коэффициенты корреляции между сериями NDVI и осадков в межгодовом цикле составляют 0,57 для пустыни, 0,64 для полупустыни и 0,74 для степи. Суммирование осадков за 1-3 предыдущие года дает увеличение величины коэффициента корреляции для полупустынных и степных вегетационных покровов

(Рисунок 3). Внутри периода вегетации фактор осадков имеет несколько меньшее влияние, рассчитанные коэффициенты корреляции колеблются от 0,51 до 0,71 в зависимости от типа растительности. Установлена асинхронность хода NDVI и хода осадков для полупустыни и степи, отставание пика NDVI от пика осадков составляет соответственно 1-2 и 2-3 декады.

Термический фактор играет бóльшую роль как в 16-тилетнем цикле, так и внутри периода вегетации. Коэффициенты корреляции, полученные для временных рядов NDVI и температур, превышают таковые, рассчитанные для NDVI и сумм осадков, что вполне согласуется с результатами ранее опубликованных работ [5, 9]. Серии NDVI положительно коррелируют с сериями температуры, усредненной за апрель-май ( $r = 0,64-0,84$ ), и отрицательно коррелируют с летними температурами. Ранее такие же результаты были получены китайскими учеными для сухих регионов КНР [4].

Пользуясь полученными уравнениями линейной регрессии, произведена оценка опасности деградации вегетационного покрова. Для этого рассчитаны отклонения фактических величины NDVI от теоретической, лежащей на эмпирической линии регрессии, на каждый год, а затем тренд отклонений за период исследования. Очаги деградации растительного покрова определялись по негативным значениям тренда.

### Литература

1. *Muneni R. B., Feeling C. D., Tucker C. J., Asrar G. & Nemani R. R.* 1997. Increased Plant Growth in the Northern high Latitudes from 1981 to 1991 // *Nature*, Vo. 386/17: 698-701.
2. *Kowabata A., Ichi K. & Yamaguchi Y.* 2001. Global Monitoring of Interannual Changes in Vegetation Activities Using NDVI and its Relationship to Temperature and Precipitation // *Int. J. Remote Sensing*, 22: 1377-1382.
3. *Tucker C. J., Slayback D. A., Pinzon J. E., Los S. O., Muneni R. B. & Taylor M. G.* 2001. Higher Northern Latitude Normalized Difference Vegetation Index and Growing Season Trends from 1982 to 1999 // *Int. J. Biometeorol.*, 45: 184-190.
4. *Xiao, J. & A. Moody.* 2004. Trends in vegetation activity and their climatic correlates: China 1982 to 1998 // *Int. J. Remote Sensing*, 25: 5669-5689.
5. *Yang, W., Yang, L. & W. Merchant.* 1997. An assessment of AVHRR/NDVI-ecoclimatic relations in Nebraska, U.S.A. // *Int. J. Remote Sensing*, 18: 2161-2180.
6. *Lei J. & A. J. Peters.* 2004. A Spatial Regression Procedure for Evaluating the Relationship between AVHRR-NDVI and Climate in the Northern Great Plains // *Int. J. Remote Sensing*, 25: 297-311.
7. *Tateishi R. & Ebata M.* 2004. Analysis of Phenological Change Patterns using 1982-2000 Advanced Very high Resolution Radiometer (AVHRR) Data // *Int. J. Remote Sensing*, 25: 2287-2300.
8. *Yang, L., Wylie, B., Tieszen, L. L., Reed, B. C.,* 1998. An analysis of relationships among climate forcing and time-integrated NDVI of grasslands over the U.S. Northern and Central Great Plains // *Remote Sensing of the Environment*, 65, 25-37.
9. *Li, B., Tao, S. & Dawson, R. W.* 2002. Relation between AVHRR NDVI and ecoclimatic parameters in China // *Int. J. Remote Sensing*, 23: 989-999.
10. *Eklundh L.* 1998. Estimating relations between AVHRR NDVI and rainfall in east Africa at 10-day and monthly time scales // *Int. J. Remote Sensing*, 19: 563-568.
11. *Kaufman Y. J. & B. N. Holben.* 1993. Calibration of the AVHRR Visible and Near Infrared Bands by Atmospheric Scattering, Ocean Glint and Desert Reflection // *Int. J. Remote Sensing*, 14: 21-52.
12. *Evans J. & R. Geerken.* 2004. Discrimination Between Climate and Humane-Induced Dryland Degradation // *J. of Arid Environment*, 57: 535-554.