

## Выявление и картографирование многолетних трендов NDVI для оценки вклада изменений климата в динамику биологической продуктивности агроэкосистем лесостепной и степной зон Северной Евразии

Н. О. Тельнова

*Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия  
E-mail: natalia.telnova@gmail.com*

В пределах обширного региона, охватывающего степи и лесостепи Северной Евразии, прогнозируемые и наблюдаемые изменения климата, особенно условий увлажнения, отличаются существенной пространственной неоднородностью, что актуализирует использование данных дистанционного зондирования для индикации динамики биологической продуктивности агроэкосистем основного сельскохозяйственного региона России и сопредельных стран под влиянием изменений климата. В качестве основного индикатора биологической продуктивности пахотных и пастбищных угодий используются суммарные за год значения NDVI. На основе анализа временных серий суммарных годовых значений NDVI, построенных по данным дистанционного зондирования низкого разрешения NOAA AVHRR и Terra MODIS и гридированных климатических данных (среднегодовых сумм осадков и индекса суровости засухи Палмера) методами непараметрической статистики выявлены значимые разнонаправленные тренды для трёх периодов, существенно различавшихся как по климатическим, так и по социально-экономическим условиям ведения сельскохозяйственной деятельности: 1980-е, 1990-е и 2000-е гг. Для каждого периода созданы и проанализированы картографические модели распределения значимых трендов NDVI по их согласованности с направленностью синхронных изменений климатических характеристик, наглядно отражающих пространственно-временную дифференциацию отклика агроэкосистем на изменения климата для различных ботанико-географических провинций степной и лесостепной зон Северной Евразии. 1980-е гг. характеризовались преобладанием позитивных трендов NDVI на фоне благоприятных условий увлажнения; 1990-е гг. отличает высокая степень несогласованности трендов NDVI с изменениями климатических характеристик, что связано с более значимой ролью антропогенных факторов на динамику продуктивности агроэкосистем. Для 2000-х гг. в пределах обширной полосы сухих и опустыненных степей от бассейна Нижнего Дона до Восточного Казахстана выявлена устойчивая негативная динамика NDVI на фоне увеличения засушливости климата, что подтверждает результаты модельных прогнозов изменений климата в этом регионе к середине XXI в.

**Ключевые слова:** анализ временных серий, NDVI, осадки, индекс Палмера, лесостепи и степи, сельскохозяйственные угодья, изменения климата

Одобрена к печати: 01.12.2017  
DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-97-107

### Введение

Лесостепная и степная зоны Северной Евразии — важные сельскохозяйственные районы России и сопредельных стран — Украины, Молдовы и Казахстана. Помимо неустойчивости агроклиматических условий, в частности, режима увлажнения, динамика сельскохозяйственного производства в регионе в течение последних трёх десятилетий определяется существенными трансформациями аграрного сектора в условиях перехода от плановой к рыночной экономике. В связи с этим, при изучении воздействий изменений климата на продуктивность агроэкосистем — пахотных и пастбищных угодий, необходимо учитывать и вклад иных, «неклиматических» факторов, определяющих динамику сельскохозяйственного производства, в частности, различных адаптационных агрохозяйственных мероприятий и смены режимов землепользования. Цель настоящего исследования заключается в сопряжённом анализе многолетних временных серий NDVI и климатических показателей за различные исторические периоды, существенно различавшиеся по условиям сельскохозяйственной политики. Такой анализ позволяет установить и интерпретировать пространственные и временные закономерности направленности воздействий климатических и антропогенных факторов на продуктивность пахотных и пастбищных угодий обширного семиаридного региона Северной

Евразии. Выделение таких периодов ограничено наличием сопоставимых временных серий данных NDVI и климатических параметров и определено в следующем виде: 1982–1990 гг. — последнее советское десятилетие, период значительных государственных инвестиций в сельское хозяйство и реализации масштабных программ по развитию аграрного сектора в СССР; 1991–1999 гг. — период реструктуризации аграрного сектора и либерализации рынка продовольствия; 2000–2010 гг. — постепенное восстановление сельскохозяйственного производства в России и сопредельных странах (Dronin, Kirilenko, 2013).

Анализ многолетних временных серий NDVI по данным дистанционного зондирования высокой периодичности и различного пространственного разрешения широко используется в России и мире при многоаспектных исследованиях динамики семиаридных экосистем на глобальном и макрорегиональном уровнях, в частности, для выявления направленности текущих изменений климата и различных биофизических параметров растительного покрова (Золотокрылин и др., 2015; Bai et al., 2008; Fensholt et al., 2012). Многочисленными исследованиями установлено, что наиболее полно оценить долговременную динамику биологической продуктивности семиаридных и аридных экосистем в пределах обширных и разнородных по ландшафтным и климатическим условиям регионов позволяет анализ временных рядов суммарных за год значений NDVI, отражающих потенциальные изменения фотосинтетической активности, чистой первичной продукции и накопления фитомассы наземной растительности независимо от продолжительности вегетационного периода и длительности фенологических фаз (Савин, Вриелинг, 2008; Bai et al., 2008; Fensholt, Proud, 2012; Mbow et al., 2013; Running et al., 2004).

## Материалы и методы исследования

В качестве исходных материалов дистанционного зондирования использовались временные серии открытых данных различного пространственного разрешения и временного охвата. Для выявления и картографирования трендов NDVI за периоды 1982–1990 и 1991–2000 гг. использовался набор данных NDVI со спутников NOAA AVHRR, созданных в рамках проекта GIMMS с пространственным разрешением 8 км (Tucker et al., 2004). На основе исходных 15-дневных композитов максимальных значений NDVI GIMMS были построены временные серии среднемесячных значений NDVI согласно методологии предварительной обработки данных NDVI GIMMS, использованной в работах (Bai et al., 2008; Beck et al., 2011). Для выявления актуальных трендов биологической продуктивности экосистем за период 2000–2016 гг. использовались временные серии месячных композитов NDVI, созданных по данным Terra MODIS с пространственным разрешением 1 км по модели MOD13A3 (Huete et al., 2010).

Выявление направленности изменений климата по трём десятилетним периодам проводилось с использованием гридированных данных реанализа количества месячных осадков GPCP Data Reanalysis (1901–2010) с пространственным разрешением  $0,5^\circ$  — наилучшим среди имеющихся на сегодняшний день временных серий климатических характеристик (Schneider et al., 2015), а также месячных значений индекса суровости засухи Палмера (PDSI), гридированных по ячейкам  $2,5^\circ$  (Day et al., 2017).

Для периодов 1982–1990, 1991–1999 и 2000–2010 гг. были построены временные серии суммарных годовых значений NDVI, среднегодовых сумм осадков и индекса Палмера, а также дополнительная временная серия суммарных годовых NDVI за 2000–2016 гг. Выявление трендов изменений NDVI и климатических показателей проводилось с использованием методов непараметрической статистики: попиксельно рассчитывались коэффициенты медианного тренда — робастной модификации линейного тренда, эффективной при анализе непостоянных и «шумных» временных рядов (Fensholt et al., 2012; Hoaglin et al., 2000) и параметры теста Манна-Кендалла (Neeti, Eastman, 2011), указывающие на присутствие позитивного или негативного тренда на разных уровнях значимости — 1 и 5 %.

Для проведения сопряжённого пространственного анализа направленности статистически значимых трендов NDVI, сумм осадков и индекса Палмера все полученные по всем временным сериям пространственно распределённые трендовые характеристики были ранжированы по следующим категориям: 1 — устойчивый позитивный тренд (уровень значимости 1 %);

2 — значимый позитивный тренд (уровень значимости 5%); 3 — тренд отсутствует; 4 — значимый негативный тренд (уровень значимости 1%), 5 — устойчивый негативный тренд (уровень значимости 1%). Полученные тематические данные далее были приведены к минимальному пространственному разрешению исходных данных — 1 км с использованием интерполяционного алгоритма «ближайший сосед», затем маскированы для сельскохозяйственных угодий лесостепной и степной зон Северной Евразии. Обобщённая маска сельскохозяйственных угодий, т.е. пахотных земель и пастбищных угодий, объединяющая луговые и степные экосистемы, была создана на основе пространственных данных о распределении типов земельного покрова Global Land Cover с исходным разрешением 1 км (Bartholomé et al., 2002). Для геоинформационного пространственного анализа природно-зональной и региональной дифференциации разнонаправленных трендов NDVI и климатических индексов региона исследования использовались векторные пространственные данные о границах ботанико-географических подзон и провинций лесостепной и степной зон Северной Евразии, полученные в результате оцифровки карты растительности России и сопредельных территорий (Карта..., 1999).

На основе попиксельного сопоставления статистически значимых разнонаправленных изменений суммарных годовых значений NDVI с тенденциями изменений осадков и индекса Палмера за периоды 1982–1990, 1991–1999 и 2000–2010 гг. по маске сельскохозяйственных угодий выявлены и картографированы позитивные и негативные статистически значимые тренды NDVI, имеющие одинаковую или противоположную направленность, с трендами изменений климатических показателей за тот же период. Для ботанико-географических провинций степной и лесостепной зон Северной Евразии проведён сравнительный количественный анализ распределения направленности трендов NDVI сельскохозяйственных угодий по согласованности с направленностью трендов изменений осадков; расчёт площадей производился в равновеликой конической проекции Альберса.

## Результаты и их обсуждение

Каждый из трёх рассмотренных периодов отличается ярко выраженной спецификой тенденций изменения биологической продуктивности агроэкосистем под влиянием разнонаправленных изменений климата. Для периода 1982–1990 гг. характерно преобладание устойчивых позитивных трендов NDVI пахотных и пастбищных угодий по всему региону исследования, при этом большая часть этих изменений происходила на фоне благоприятных условий увлажнения (*рис. 1*). Наиболее интенсивный рост индекса Палмера (на 0,4–0,6 в год) и количества осадков (до 60 мм в год) в этот период отмечается в бассейнах Днепра, Дона и средней части бассейна Волги. Тенденции к увеличению засушливости климата проявлялись только на западных и восточных перифериях региона: на Подольской возвышенности, Причерноморской низменности, степных равнинах Крыма, а также в северо-восточной части Казахского мелкосопочника и на Кулундинской равнине при интенсивности снижения PDSI на 0,2–0,4 ед. в год и осадков на 5–10 мм. В то же время локальные ареалы сельскохозяйственных угодий с ростом NDVI на фоне региональных и локальных ухудшений условий увлажнения отмечаются в пределах всех лесостепных и северостепных провинций, и при этом совокупная доля сельскохозяйственных угодий с позитивными трендами NDVI снижается в направлении увеличения степени континентальности климата, тогда как для сухих и опустыненных степей такая закономерность не выражена (*рис. 2*). Можно предположить, что в условиях благоприятной сельскохозяйственной политики в 1980-е гг., связанной с ростом инвестиций в сельское хозяйство, реализацией долгосрочных государственных программ по созданию территориальных агроиндустриальных комплексов и Продовольственной программы СССР, позитивная динамика продуктивности агроэкосистем определялась как климатическими, так и антропогенными факторами, в отдельных случаях способных компенсировать влияние неблагоприятных погодных условий. Это подтверждается и статистическими моделями, объясняющими рост урожайности зерновых в степных регионах России и Украины в 1980-е гг. не только климатическими условиями, но и эффективными агротехническими мерами (Dronin, Kirilenko, 2013; Müller et al., 2016).

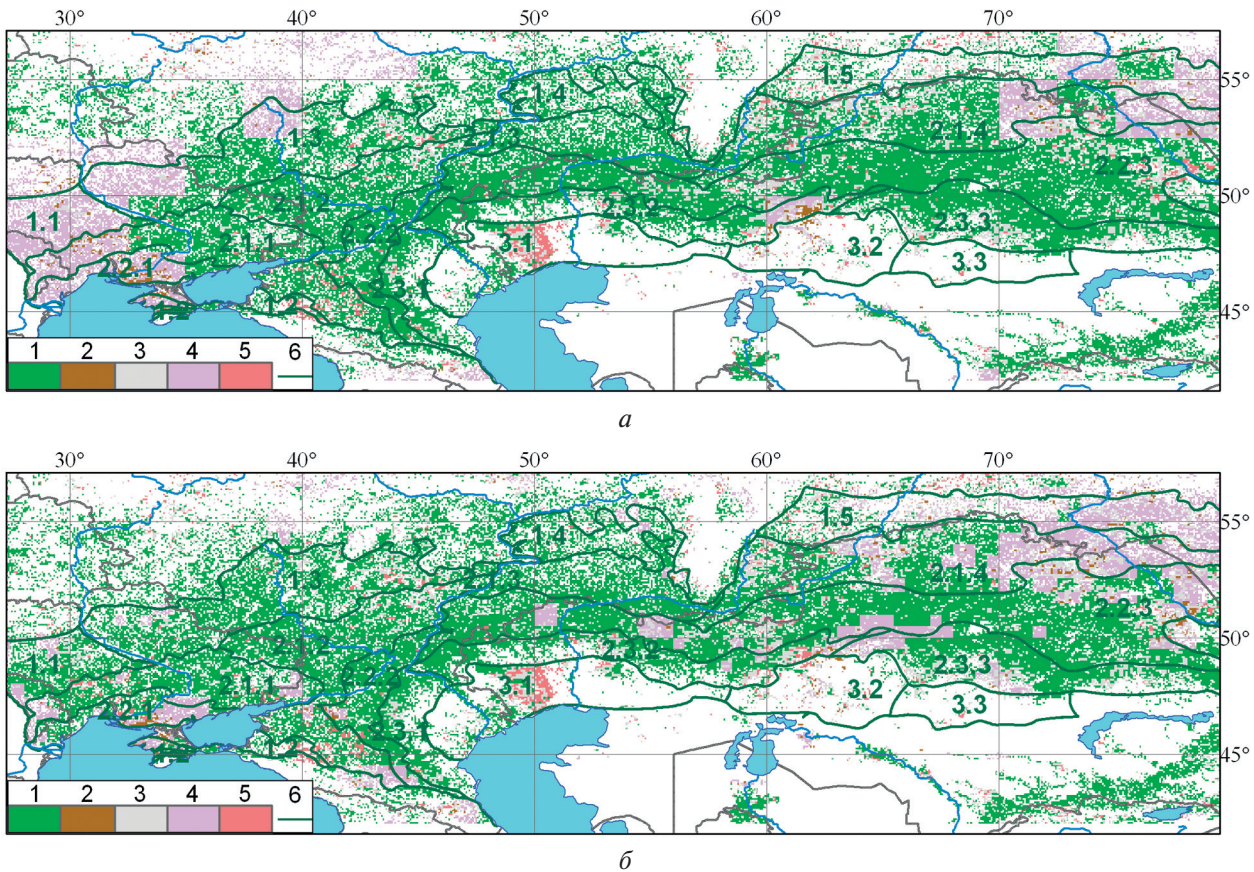


Рис. 1. Направленность изменений суммарных годовых значений NDVI пахотных и пастбищных угодий лесостепной и степной зон Северной Евразии в зависимости от изменений индекса Палмера (а) и количества осадков за 1982–1990 гг. (б): 1 — рост NDVI при росте индекса Палмера/осадков; 2 — снижение NDVI при снижении индекса Палмера/осадков; 3 — тренд NDVI отсутствует; 4 — рост NDVI на фоне снижения индекса Палмера/осадков; 5 — снижение NDVI на фоне роста индекса Палмера и осадков; 6 — границы подзон и ботанико-географических провинций степи и лесостепи. Номера на карте обозначены: лесостепи — днепровско-днестровские (1.1.); крымско-кавказские предгорные (1.2); днепровско-приволжские (1.3), заволжские (1.4.), западносибирские (1.5); северные степи — западнопричерноморские (2.1.1), восточнопричерноморские (2.1.2), заволжские, или волгоуральские (2.1.3); западносибирские (2.1.4.); сухие степи — причерноморские (2.2.1), донско-волжские (2.2.2), заволжско-западноказахстанские (2.2.3); опустыненные степи — прикаспийские (2.3.1), заволжско-западноказахстанские (2.3.2), восточноказахстанские (2.3.3); северные пустыни — прикаспийские (3.1), западно-северотуранские (3.2), центрально-северотуранские (3.3). Исходный масштаб 1:20 000 000

Снижение NDVI на фоне роста осадков и индекса Палмера может указывать на очаги антропогенной деградации земель: так, в 1982–1990 гг. наиболее крупные ареалы пастбищных угодий с негативной динамикой NDVI на фоне роста осадков и индекса Палмера зафиксированы в пределах прикаспийских северных пустынь для южной части массива Рын-Пески на Волго-Уральском междуречье (см. рис. 1). Согласно статистическим данным и результатам одновременного геоботанического картографирования (Махамбетов, 2016), на этой территории (современный Курмангазинский район Атырауской области Республики Казахстан) в 1988–1990 гг. преобладали средне- и сильнодеградированные вследствие перевыпаса пастбища, большей частью восстановившиеся к настоящему времени на 70 % при резком снижении поголовья выпасаемого скота с 1994 г.

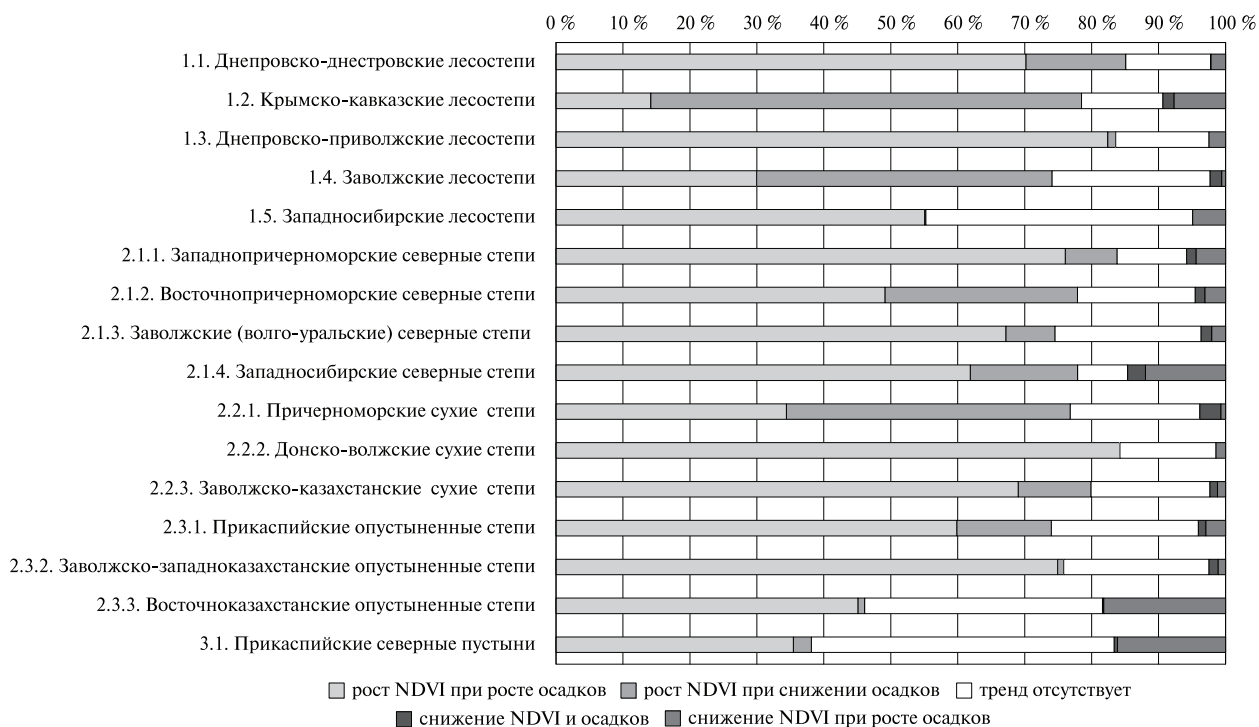
Период 1991–1999 гг. в целом отличается преобладанием негативной динамики продуктивности экосистем на фоне менее значительной согласованности с изменениями климатических условий (рис. 3). В течение десятилетия отмечались неоднократные сильные засухи: в 1991, 1995, 1998 и 1999 гг. (Страшная и др., 2011), с другой стороны, на постсоветском

пространстве реформы в аграрном секторе происходили в условиях экономического кризиса; в целом период характеризуется падением сельскохозяйственного производства, выведением из сельскохозяйственного оборота пахотных земель и существенным снижением нагрузки на пустынно-степные и пустынные пастбища, уменьшением объёма вносимых удобрений и развитием деградационных процессов на пахотных землях. Установлено, что снижение урожайности зерновых в странах России и СНГ в 1990-е гг. коррелирует с климатическими факторами намного слабее, чем в предшествующее десятилетие (Dronin, Kirilenko, 2013).

Пространственное распределение однонаправленных трендов климатических показателей и NDVI крайне неоднородно: наиболее интенсивное снижение индекса Палмера на 0,2–0,4 ед. в год отмечается в низовьях Волги, Восточном Предкавказье, центральной части Казахского мелкосопочника и на Кулундинской равнине (см. *рис. 3а*); ареалы существенного снижения количества осадков (на 10–20 мм ежегодно) и согласованного с ними снижения NDVI охватывают также Подольскую возвышенность, междуречье Дона и Днепра; Заволжье и Восточный Прикаспий (см. *рис. 3б*). В пределах всех лесостепных и степных провинций наблюдается очень высокая доля агроэкосистем со снижением NDVI на фоне увеличения осадков: от 6% для причерноморских сухих степей до 76% в западносибирской лесостепной провинции (*рис. 4*).

Крупные компактные ареалы агроэкосистем с таким типом изменений отмечаются в пределах Среднерусской и Приволжской возвышенности, в Заволжье Предуралья, Центральном Казахстане.

2000-е гг. характеризуются наибольшей согласованностью негативных трендов NDVI с увеличением засушливости климата. В частности, устойчивые негативные тренды NDVI, согласованные с направленностью интенсивного снижения индекса Палмера (0,45–0,6 ед. в год) и количества осадков (15–20 мм), формируют компактный и протяжённый субширотный ареал, охватывающий полосу сухих и опустыненных степей от бассейна Нижнего Дона до Восточного Казахстана (*рис. 5*). Максимальная доля сельскохозяйственных угодий с таким типом изменений достигает 86% в пределах заволжско-западноказахстанских опустыненных степей (*рис. 6*).



*Рис. 2.* Распределение направленности трендов суммарных годовых NDVI пахотных и пастбищных угодий в зависимости от изменений количества осадков по ботанико-географическим провинциям степи и лесостепи за 1982–1990 гг.

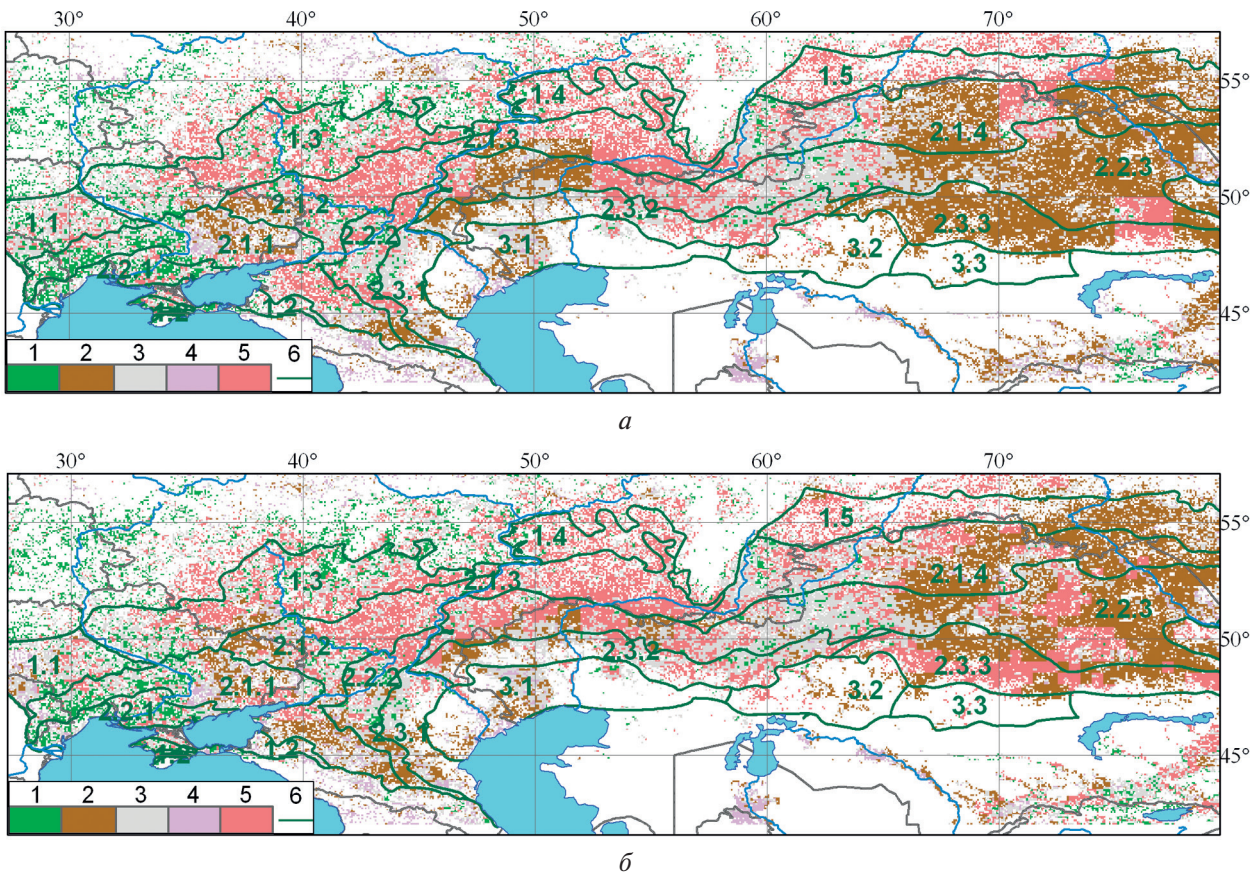


Рис. 3. Направленность изменений суммарных годовых значений NDVI пахотных и пастбищных угодий лесостепной и степной зон Северной Евразии в зависимости от изменений индекса Палмера (а) и количества осадков за 1991–1999 гг. (б). Условные обозначения и масштаб как на рис. 1

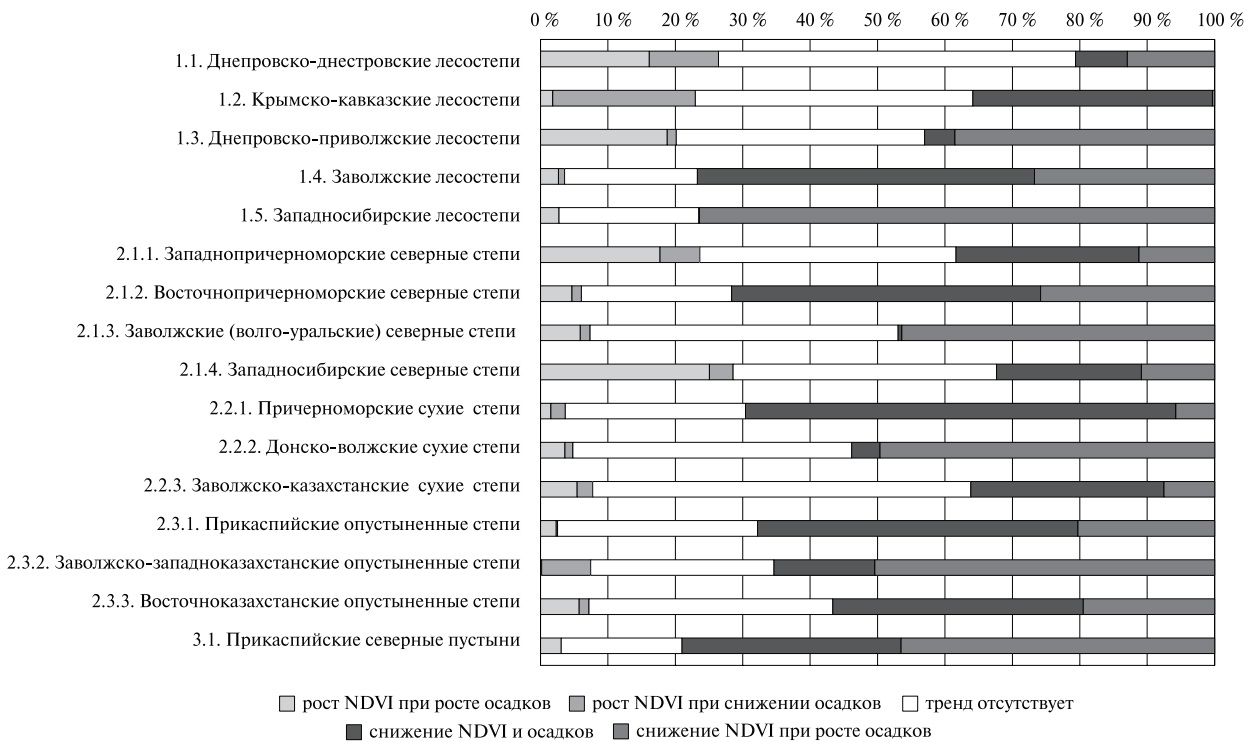


Рис. 4. Распределение направленности трендов суммарных годовых NDVI пахотных и пастбищных угодий в зависимости от изменений количества осадков по ботанико-географическим провинциям степи и лесостепи за 1991–1999 гг.

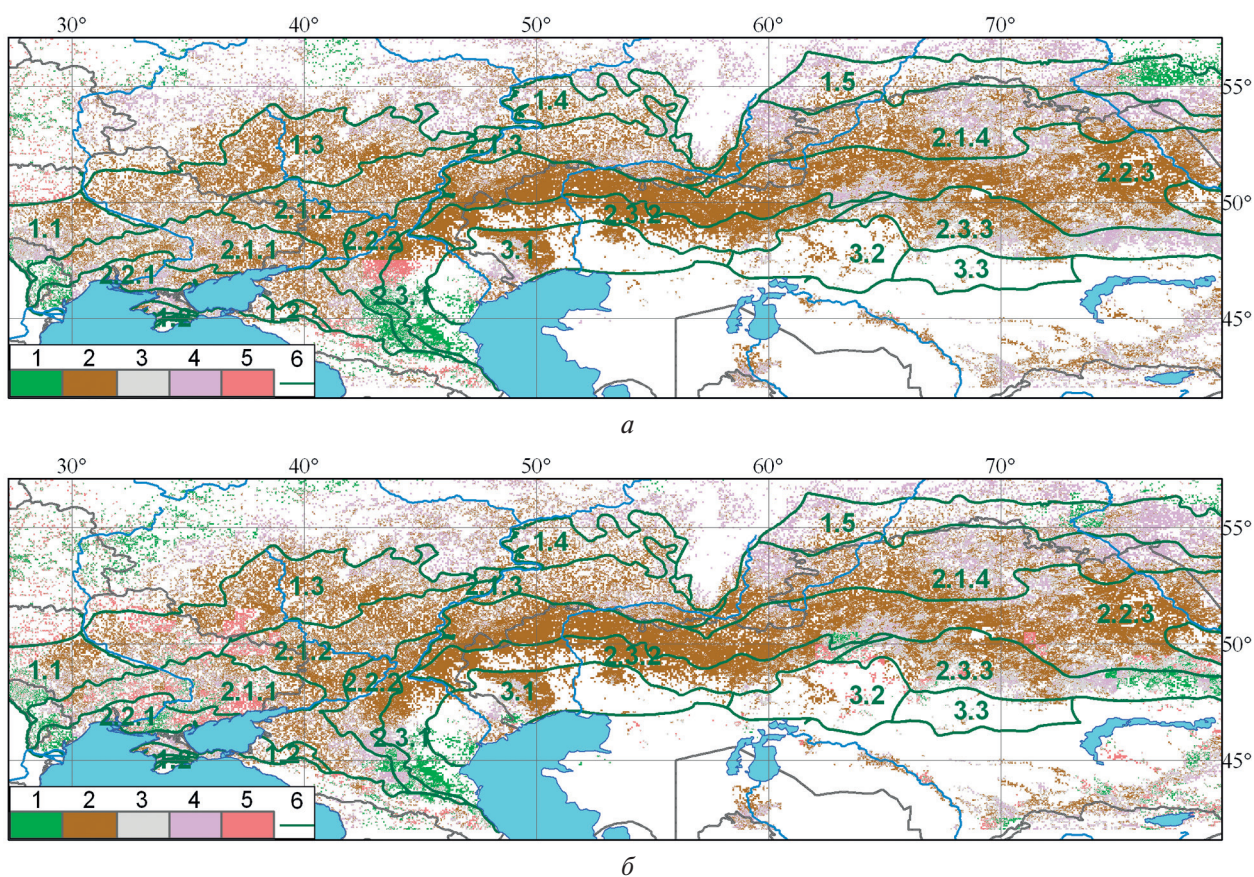


Рис. 5. Направленность изменений суммарных годовых значений NDVI пахотных и пастбищных угодий лесостепной и степной зон Северной Евразии в зависимости от изменений индекса Палмера (а) и количества осадков за 2000–2010 гг. (б). Условные обозначения и масштаб как на рис. 1

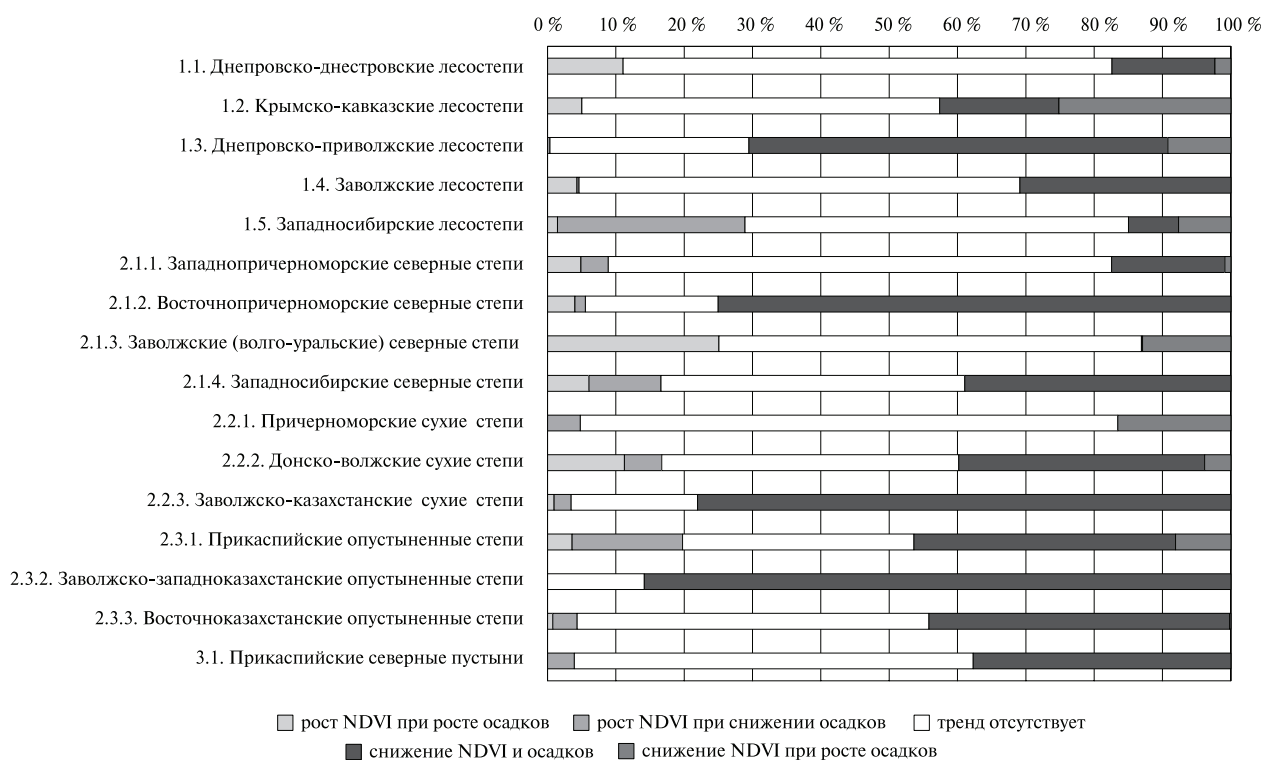


Рис. 6. Распределение направленности трендов суммарных годовых NDVI пахотных и пастбищных угодий в зависимости от изменений количества осадков по ботанико-географическим провинциям степи и лесостепи за 2000–2010 гг.

Ростом NDVI на фоне увеличения осадков и индекса Палмера отличаются агроэкосистемы лесостепных и северостепных равнин Западной Сибири и Северо-Восточного Казахстана, сухих и опустыненных степей Восточного Предкавказья и Западного Прикаспия. Стоит отметить, что для сухих и опустыненных степей Восточного Предкавказья и Восточного Казахстана и западной периферии западносибирских лесостепей рост NDVI в большей степени согласован не с ростом осадков, а индексом Палмера, что косвенно свидетельствует о более значительном вкладе роста температуры, а не осадков в динамику продуктивности агроэкосистем: за 2000-е гг. в регионе исследования это десятилетие являлось самым тёплым за период наблюдений, и характеризовалось аномально тёплыми зимами и жаркими весенне-летними сезонами с обильными ливневыми осадками (Dronin, Kirilenko, 2013).

### Заключение

Вклад изменений климата в динамику биологической продуктивности пахотных и пастбищных угодий, индцированную на основе анализа временных серий суммарных годовых значений NDVI в лесостепной и степной зонах Северной Евразии, отличается существенной пространственной и временной неоднородностью. 1980-е гг. характеризовались стабильными и в целом благоприятными климатическими условиями, что в совокупности с позитивным воздействием реформ аграрного сектора привело к положительной динамике продуктивности сельскохозяйственных угодий за этот период, достаточно однородно проявленной в пределах всего региона исследования. В 1990-е гг., несмотря на высокую несогласованность изменений NDVI с климатическими параметрами и её значительную пространственную гетерогенность, выявлены очаги устойчивого снижения NDVI на фоне увеличения засушливости климата в опустыненных степях Заволжья, Восточного Прикаспия и северных степях Восточного Казахстана и Западной Сибири. В 2000-е гг. эти регионы продолжают испытывать аридизацию, ареал которой существенно расширился, сформировав субширотную «полосу», охватившую бассейн нижнего Дона, Нижнее Заволжье, Предуралье и Зауралье. В то же время для агроэкосистем в пределах сухих и опустыненных степей Предкавказья негативный тренд NDVI на фоне неблагоприятных условий увлажнения в 1990-е гг. сменился устойчивым позитивным трендом в последующее десятилетие. Выявленная для этих регионов устойчивая динамика NDVI, однонаправленная с изменениями увлажнения, прослеживается и за период 2000–2016 гг. (рис. 7). Полученные выводы подтверждают результаты модельных прогнозов изменений дефицита влаги и тепловых ресурсов в лесостепной и степной зонах Северной Евразии (Dronin, Kirilenko, 2011), согласно которым к 2020, 2050 и 2080 гг. ожидается усиление аридизации климата, наиболее выраженное в Предуралье и бассейне Нижней Волги.

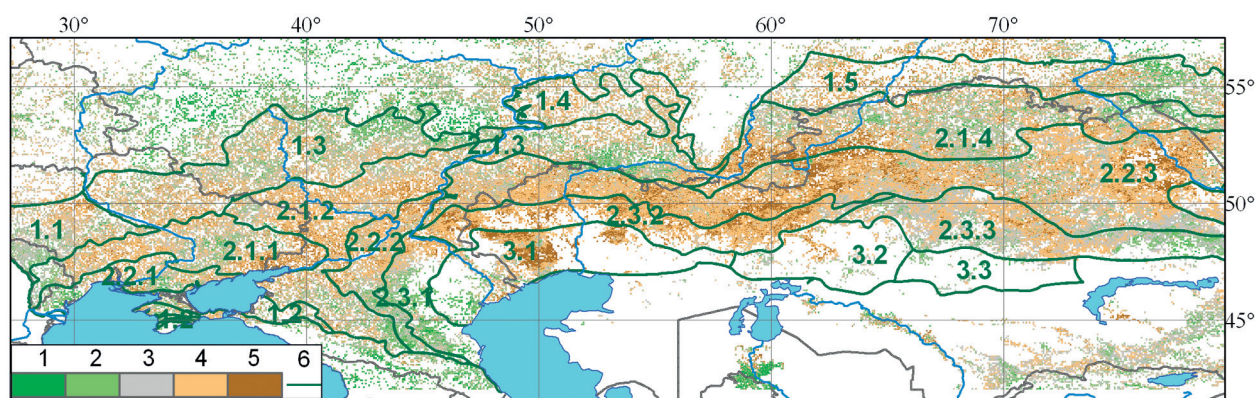


Рис. 7. Направленность трендов суммарных годовых значений NDVI за 2000–2016 гг.: 1 — устойчивый позитивный тренд (уровень значимости 1 %); 2 — значимый позитивный тренд (уровень значимости 5 %); 3 — тренд отсутствует; 4 — значимый негативный тренд (уровень значимости 1 %), 5 — устойчивый негативный тренд (уровень значимости 1 %); 6 — границы подзон и ботанико-географических провинций степи и лесостепи (расшифровку их нумерованных обозначений на карте приведена в подписи к рис. 1)



Исследование выполнено в рамках темы ФНИ Государственных академий наук на 2013–2020 гг. 0148-2014-0030 («Разработка новых технологий геоинформационного и картографического обеспечения географических исследований»), рег. номер № 01201352481.

## Литература

1. *Золотокрылин А. Н., Титкова Т. Б., Черенкова Е. А., Виноградова В. В.* Тренды увлажнения и биофизических параметров засушливых земель Европейской части России за период 2000–2014 гг. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 2. С. 155–161.
2. Карта «Зоны и типы поясности растительности России и сопредельных территорий. Масштаб 1:8 000 000 / под ред. Огуреевой Г. Н. М.: «Экор», 1999. 64 с.
3. *Махамбетов М. Ж.* Оценка процессов восстановления деградированных экосистем Атырауской области: дисс. ... д-ра философии (спец. 6D060800). Алматы: КНАУ, 2016. 152 с.
4. *Савин И. Ю., Вриелинг А.* Анализ многолетней динамики растительных ресурсов на территории России по данным NOAA AVHRR // *Исследование Земли из космоса*. 2008. № 5. С. 74–82.
5. *Страшная А. И., Максименкова Т. А., Чуб О. В.* О сроках сева озимых культур в условиях изменения климата и их прогнозирование в Приволжском федеральном округе // *Труды Гидрометцентра России*. 2011. Вып. 345. С. 175–193.
6. *Bai Z. G., Dent D. L., Olsson L., Schaepman M. E.* Global assessment of land degradation and improvement. 1. Identification by remote sensing: Report 2008/01. Wageningen: Intern. Soil Reference and Information Centre (ISRIC), 2008. 69 p.
7. *Bartholomé E., Belward A., Frédéric A., Bartalev S., Carmona-Moreno C., Eva H., Fritz S., Grégoire J., Mayaux P., Stibig H.-J. E. E.* GLC 2000: Global Land Cover Mapping for the Year 2000: Project Status November 2002. European Commission, Joint Research Center, 2002. P. 66.
8. *Beck H. E., McVicar T. R., van Dijk A. I. J. M., Schellekens J., de Jeu R. A. M., Bruijnzeel L. A.* Global evaluation of four AVHRR–NDVI data sets: Intercomparison and assessment against Landsat imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2011. V. 115. No. 10. P. 2547–2563.
9. *Dai A.* The Climate Data Guide: Palmer Drought Severity Index (PDSI) // eds. National Center for Atmospheric Research Staff. 2017. Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/palmer-drought-severity-index-pdsi/>.
10. *Dronin N. M., Kirilenko A. P.* Climate change, food stress, and security in Russia // *Regional Environmental Change*. 2011. V. 11. No. 1. P. 167–178.
11. *Dronin N. M., Kirilenko A. P.* Weathering the soviet countryside: The impact of climate and agricultural policies on Russian grain yields, 1958–2010 // *Soviet and Post-Soviet Review*. 2013. V. 40. No. 1. P. 115–143.
12. *Fensholt R., Langanke T., Rasmussen K., Reenberg A., Prince S. D., Tucker C., Scholes R. J., Le Q. B., Bondeau A., Eastman R.* Greenness in semi-arid areas across the globe 1981–2007 — an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers // *Remote Sensing of Environment*. 2012. V. 121. P. 144–158.
13. *Fensholt R., Proud S. R.* Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends — Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series // *Remote Sensing of Environment*. 2012. V. 119. P. 131–147.
14. *Hoaglin D. C., Mosteller F., Tukey J. W.* Understanding robust and exploratory data analysis. N.Y.: Wiley, 2000. 447 p.
15. *Huete A., Didan K., Leeuwen W. van Miura T., Glenn E.* MODIS Vegetation Indices // *Land Remote Sensing and Global Environmental Change. Remote Sensing and Digital Image Processing*. N.Y.: Springer, 2010. P. 579–602.
16. *Mbow C., Fensholt R., Rasmussen K., Diop D.* Can vegetation productivity be derived from greenness in a semi-arid environment? Evidence from ground-based measurements // *J. Arid Environments*. 2013. V. 97. P. 56–65.
17. *Müller D., Jungandreas A., Koch F., Schierhorn F.* Impact of Climate Change on Wheat Production in Ukraine: Agricultural policy report APD/APR/02/2016. Kyiv, 2016. 41 p.
18. *Neeti N., Eastman J. R.* A Contextual Mann-Kendall Approach for the Assessment of Trend Significance in Image Time Series: A Novel Method for Testing Trend Significance // *Transactions in GIS*. 2011. Vol. 15. No. 5. P. 599–611.
19. *Running S. W., Heinsch F. A., Zhao M., Reeves M., Hashimoto H.* A continuous satellite-derived measure of global terrestrial production // *Bioscience*. 2004. V. 54. No. 6. P. 547–560.

20. Schneider U., Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., Rudolf B., Ziese M. GPCP Full Data Reanalysis Version 7.0 at 0.5: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data. 2015. DOI:10.5676/DWD\_GPCP/FD\_M\_V7\_050.
21. Tucker C.J., Pinzon J.E., Brown M.E. Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) Satellite Drift Corrected and NOAA-16 incorporated Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Monthly 1981–2002. College Park, Maryland: Global Land Cover Facility, University of Maryland, 2004.

## Revealing and mapping long-term NDVI trends for the analysis of climate change contribution to agroecosystems' productivity dynamics in the Northern Eurasian forest-steppe and steppe

N. O. Telnova

*Institute of Geography RAS, Moscow, 119017, Russia*  
*E-mail: natalia.telnova@gmail.com*

Northern Eurasian forest-steppe and steppe encompass huge region where observed and projected climate change and in particular change in precipitation regime demonstrate high spatial heterogeneity. In this study, spatial and temporal variations of croplands and grasslands productivity in the main agricultural regions of Russia and adjacent countries are indicated by means of sum annual NDVI time series analysis. For the three decadal periods with different climatic and socio-economic conditions (1980s, 1990s and 2000s) we constructed time series of NDVI extracted from low-resolution remote sensing data (NOAA AVHRR, Terra MODIS) and time series of gridded climate data — precipitation and PDSI. Revealed non-parametric significant trends in sum annual NDVI were analyzed on the concordance of their signs with climate data trends for different forest-steppe and steppe ecoregions. Spatial analysis and resulted maps demonstrate the predominance of positive NDVI trends throughout the region for the 1980s under favorable climatic conditions whereas the 1990s are characterized with high spatially heterogeneous disagreement between signs of NDVI and climatic trends with more significant anthropogenic impact on general decline in agro-ecosystems' productivity. In the 2000s the presence of extensive belt elongated through dry and deserted steppes from Lower Don basin to the Eastern Kazakhstan with stable negative NDVI trend under regional aridization verifies results of projected climate change in this region towards the middle of the 21 century.

**Keywords:** time series analysis, NDVI, precipitation, PDSI, forest-steppes and steppes, agricultural lands, climate change

Accepted: 01.12.2017  
DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-97-107

### References

1. Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Cherenkova E.A., Vinogradova V.V., Trendy uvlazhneniya i biofizicheskikh parametrov zasushlivykh zemel' Evropeiskoi chasti Rossii za period 2000–2014 gg. (Trends of moisture indexes and biophysical parameters of European Russia drylands for the period of 2000–2014), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 2, pp. 155–161.
2. Karta "Zony i tipy poyasnosti rastitel'nosti Rossii i sopredel'nykh territorii". *Mashtab 1:8000000* (Map "Vegetation zones and altitudinal belts of Russia and adjacent territories". Scale 1:8000000), Moscow: "Ekor", 1999, 64 p.
3. Mahambetov M. Zh. *Otsenka protsessov vosstanovleniya degradirovannykh ekosistem Atyrauskoj oblasti: Diss. doktora filosofii* (Assessment of rehabilitation processes in degraded ecosystems of Atyrau region: PhD thesis), Almaty: KNAU, 2016, 152 p.
4. Savin I. Yu., Vrieling A., Analiz mnogoletnei dinamiki rastitel'nykh resursov na territorii Rossii po dannym NOAA AVHRR (Analysis of Agricultural Vegetation Dynamics in Russia Based on NOAA AVHRR Data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2008, No. 5, pp. 74–82.
5. Strashnaya A. I., Maksimenkova T. A., Chub O. V., O srokakh seva ozimnykh kul'tur v usloviyakh izmeneniya klimata i ikh prognozirovanie v Privolzhskom federal'nom okruge (Seeding times of winter crops under the

- conditions of climate change and their forecast in the Privolzhskiy federal region), *Trudy Gidromettsentra Rossii* (Proceedings of The Hydrometeorological Center of Russia), 2011, Issue 345, pp. 175–193.
6. Bai Z. G., Dent D. L., Olsson L., Schaepman M. E., *Global assessment of land degradation and improvement. 1. Identification by remote sensing*. Report 2008/01, Wageningen: International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), 2008, 69 p.
  7. Bartholomé E., Belward A., Frédéric A., Bartalev S., Carmona-Moreno C., Eva H., Fritz S., Grégoire J., Mayaux P., Stibig H.-J. E. E., *GLC 2000: Global Land Cover Mapping for the Year 2000: Project Status November 2002*, European Commission, Joint Research Center, 2002, 66 p.
  8. Beck H. E., McVicar T. R., van Dijk A. I. J. M., Schellekens J., de Jeu R. A. M., Bruijnzeel L. A., Global evaluation of four AVHRR–NDVI data sets: Intercomparison and assessment against Landsat imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, No. 10, pp. 2547–2563.
  9. Dai A., *The Climate Data Guide: Palmer Drought Severity Index (PDSI)*, 2017, Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/palmer-drought-severity-index-pdsi>.
  10. Dronin N. M., Kirilenko A. P., Climate change, food stress, and security in Russia, *Regional Environmental Change*, 2011, Vol. 11, No. 1, pp. 167–178.
  11. Dronin N. M., Kirilenko A. P., Weathering the soviet countryside: The impact of climate and agricultural policies on Russian grain yields, 1958–2010, *Soviet and Post-Soviet Review*, 2013, Vol. 40, No. 1, pp. 115–143.
  12. Fensholt R., Langanke T., Rasmussen K., Reenberg A., Prince S. D., Tucker C., Scholes R. J., Le Q. B., Bondeau A., Eastman R., Greenness in semi-arid areas across the globe 1981–2007 — an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 121, pp. 144–158.
  13. Fensholt R., Proud S. R., Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends — Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 119, pp. 131–147.
  14. Hoaglin D. C., Mosteller F., Tukey J. W., *Understanding robust and exploratory data analysis*, New York: Wiley, 2000, 447 p.
  15. Huete A., Didan K., Leeuwen W. van Miura T., Glenn E., MODIS Vegetation Indices, *Land Remote Sensing and Global Environmental Change. Remote Sensing and Digital Image Processing*, New York: Springer, 2010, pp. 579–602.
  16. Mbow C., Fensholt R., Rasmussen K., Diop D., Can vegetation productivity be derived from greenness in a semi-arid environment? Evidence from ground-based measurements, *Journal of Arid Environments*, 2013, Vol. 97, pp. 56–65.
  17. Müller D., Jungandreas A., Koch F., Schierhorn F., *Impact of Climate Change on Wheat Production in Ukraine: Agricultural policy report APD/APR/02/2016*. Kyiv, 2016, 41 p.
  18. Neeti N., Eastman J. R., A Contextual Mann-Kendall Approach for the Assessment of Trend Significance in Image Time Series: A Novel Method for Testing Trend Significance, *Transactions in GIS*, 2011, Vol. 15, No. 5, pp. 599–611.
  19. Running S. W., Heinsch F. A., Zhao M., Reeves M., Hashimoto H., A continuous satellite-derived measure of global terrestrial production. *Bioscience*, 2004, Vol. 54, No. 6, pp. 547–560.
  20. Schneider U., Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., Rudolf B., Ziese M., *GPCC Full Data Reanalysis Version 7.0 at 0.5°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data*, 2015. DOI:10.5676/DWD\_GPCC/FD\_M\_V7\_050.
  21. Tucker C. J., Pinzon J. E., Brown M. E., *Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) Satellite Drift Corrected and NOAA-16 incorporated Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Monthly 1981–2002*, College Park, Maryland: Global Land Cover Facility, University of Maryland, 2004.