

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОТКЛИК РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ РАВНИНЫ НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В 1982–2015 гг.

© 2021 г. Е. М. Короткова^{a, b, *}, В. В. Зуев^a

^aИнститут мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

^bТомский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

*E-mail: katia_sova@mail.ru

Поступила в редакцию 25.05.2021 г.

Работа посвящена исследованиям отклика разных типов растительного покрова Западно-Сибирской равнины на наблюдаемые в последние десятилетия температурные изменения. В работе проведен анализ трендов рядов вегетационного индекса NDVI и температуры воздуха в районах метеостанций Западно-Сибирской равнины, характеризующихся различными типами растительности. Выявлены фазы роста (1982–1997 гг.) и стабилизации (1997–2015 гг.) значений NDVI на фоне наблюдаемого эффекта замедления глобального потепления, уменьшения солнечной активности и смены фаз температуры поверхности океана в регионе Эль-Ниньо (ONI) с положительной на отрицательную. Показано, что весенние месяцы вносят основной вклад в вариации сезонного значения NDVI. Проведен корреляционный анализ весенних значений NDVI и температуры воздуха в периоды роста и стабилизации NDVI. Показано, что характер отклика растительности на наблюдающееся увеличение температуры зависит от ее типа и местоположения. Так, связь NDVI и температуры воздуха в зоне тундры возрастает, на сильно заболоченных территориях лесотундры и северной тайги – снижается, на территории Обь-Енисейского междуречья от лесотундры до подтайги в большинстве случаев снижается, на территории левобережья Оби – возрастает.

Ключевые слова: растительный покров, NDVI, температура воздуха, климатические изменения, Западная Сибирь

DOI: 10.31857/S0205961421060051

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с наблюдающимися климатическими изменениями множество исследований посвящено глобальным и региональным изменениям растительного покрова. Данные нормализованного разностного индекса растительности (NDVI) свидетельствуют об изменениях продуктивности растительности в северных регионах Евразии и Америки, являющихся наиболее чувствительными к растущей температуре воздуха (Seidl et al., 2017; Seddon et al., 2016). В последние десятилетия в тундре регистрируется широко распространенное “позеленение”, на которое указывают увеличивающиеся максимумы NDVI в вегетационный период (Walker et al., 2009; Epstein et al., 2012; Bhatt et al., 2017), в то же время в некоторых районах зоны бореальных лесов отмечается смена тенденции NDVI с “позеленения” на “потемнение” (Beck, Goetz 2011; Елсаков, Телятников, 2013; Vuergmann et al., 2014). Однако, наблюдаемые тенденции очень чувствительны к временной и пространственной выборке и имеют большую пространственную неоднородность (Miles and Esau, 2016).

Территория Западно-Сибирской равнины слабо изучена на предмет климатически-обусловленных изменений продуктивности растительного покрова. Немногочисленные исследования растительного покрова таежной зоны региона фрагментарны и связаны преимущественно с антропогенным воздействием на ландшафты вследствие активной разработки нефтегазовых месторождений (Шарикалов, Якутин, 2012; Алексева, Яценко, 2013; Коркина, Талынева, 2015; Кобзарь и др., 2016). Имеющиеся оценки изменений растительности тундры указывают на рост ее продуктивности в последние десятилетия (Елсаков, Телятников, 2013; Титкова, Виноградова, 2015; Белонская и др., 2011). Попытка оценки изменений продуктивности разных типов растительности северной части Западно-Сибирской равнины в 2000–2016 гг. была предпринята в работе Miles et al., 2019, в которой так же было установлено преимущественное увеличение продуктивности растительности в тундре и ее снижение в тайге. Тренды же NDVI за период 1982–2015, рассмотренные в работе Зуев и др., 2019, показывают преимущественно положительные тенденции про-

дуктивности растительности, как в зоне тундры, так и в зоне тайги.

Климатические исследования свидетельствуют о том, что температура воздуха в Сибири растет более быстрыми темпами по сравнению с другими регионами (Cohen et al., 2014), а климатические модели показывают дальнейшее потепление (Miao et al., 2014). В этой связи исследование отклика различных типов растительности Западно-Сибирской равнины, являющейся одним из самых значительных пулов углерода в мире, к наблюдаемым климатическим изменениям, представляется особо важной задачей. Имеющиеся данные об NDVI с 1982 по 2015 гг. (Pinzon and Tucker, 2014) позволяют оценить тенденции изменений продуктивности различных типов растительности Западно-Сибирской равнины более чем за 30 лет и сопоставить их с температурными изменениями того же периода.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Для оценки влияния климатических изменений на растительность Западной Сибири был проведен анализ связи вегетационного индекса NDVI и температуры воздуха. Анализ производился для территорий вблизи метеостанций Росгидромета, имеющих длинные ряды наблюдений за температурой воздуха. Таким образом, было отобрано 33 метеостанции, расположенные в природных зонах от тундры до подтайги, более южные станции не участвовали в анализе по причине высокой антропогенной нарушенности ландшафтов этих территорий (обилие пахотных земель). Ряды среднемесячной температуры воздуха были получены с помощью сервиса ВНИИГМИ-МЦД (Булыгина и др.). В качестве индикатора состояния растительности использовался вегетационный индекс NDVI, являющийся показателем количества фотосинтетически активной биомассы и определяющийся по разности спектральной яркости между красным и ближним инфракрасным диапазонами на космоснимках поверхности Земли. В работе использовались данные NDVI GIMMS, полученные с помощью многоканального радиометра AVHRR, размещенного на борту спутников NOAA, и представляющие собой среднемесячные значения индекса NDVI за период 1982–2015 гг. с разрешением $1/12 \times 1/12^\circ$, (Pinzon and Tucker, 2014). Не смотря на то, что данные набора NDVI GIMMS доступны лишь до 2015 г., он является наиболее репрезентативным долгопериодным набором из представленных в настоящее время (Marshal et al., 2016; Tian et al., 2015). Для расчета NDVI в окрестностях каждой метеостанции выбиралась область размером $0.5 \times 0.5^\circ$ с наиболее однородным типом растительности и минимальным количеством объектов инфраструктуры, данные в которой осреднялись. Типы раститель-

ности определялись в соответствии с картой растительности России, разработанной в ИКИ РАН на основе данных спутникового мониторинга земной поверхности (Барталев и др., 2011). Все расчеты выполнены для уровня значимости 0.05.

Список метеостанций, отобранных для анализа, с указанием природной зоны, характерного типа растительности в выбранном для каждой станции квадрате $0.5 \times 0.5^\circ$ и теплового периода для каждой природной зоны, определенного по данным среднемесячной температуры воздуха на рассматриваемых станциях за период 1982–2015, приведен в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Одним из основных факторов, определяющих продуктивность растительных систем, является температура воздуха. Растительность северных территорий особо чувствительна к колебаниям температуры воздуха осеннего и весеннего периодов, когда температура выступает лимитирующим фактором фотосинтеза и определяет начало и конец вегетационного периода, а также сроки наступления фенологических явлений (Wang et al., 2011, Piao et al., 2008, 2011, 2015). Для оценки изменений NDVI и температуры воздуха за теплый период, определенный в табл. 1, были рассчитаны сезонные значения параметров для каждой станции и их линейные тренды за 1982–2015 гг. Как видно из рис. 1, а значимые положительные тренды сезонного значения NDVI наблюдаются в районах большинства метеостанций региона кроме сильно заболоченных территорий лесотундры и северной тайги – районов станций Салехард, Янов Стан, Надым, Тарко-Сале, Толька, Березово, Халясавэй, а также среднетаежной станции Александровское, для которых тренды сезонного значения NDVI не значимы. Тренды температуры воздуха теплого периода на большинстве станций региона положительны, однако не значимы (рис. 1, б).

При анализе динамики сезонного значения NDVI было выявлено, что характер его увеличения на большинстве станций региона не линейен. При осреднении сезонных значений NDVI в пределах природных зон, становится видно, что в большинстве случаев NDVI достигает своего пикового значения в 1997 г., а с конца 1990-х–начала 2000-х годов наблюдается спад либо стабилизация его значений во всех природных зонах (рис. 2, а). При этом увеличение сезонного значения NDVI в 1982–1997 гг. (тренды значимы для всех природных зон региона) происходит на фоне увеличения сезонной температуры воздуха лишь на станциях южной тайги и подтайги, в остальных природных зонах тренды сезонного значения температуры воздуха в 1982–1997 гг. близки к нулю либо отрицательны (рис. 2, б). Таким образом, видно, что при общих положительных трендах NDVI и тем-

Таблица 1. Характеристики отобранных для анализа метеостанций

Природная зона	Станция	Тип растительности в районе метеостанции	Теплый период
Тундра	Антипаюта	Растительность скудная – мхи, лишайники и низкорослые кустарники	Июнь–сентябрь
	Новый Порт	Кустарниковая, травянистая, кустарничковая растительность	
	Тазовский	Кустарниковая растительность	
	Ныда	Кустарниковая, болотная растительность	
Лесотундра	Салехард	Прибрежная растительность, болотная растительность	Май–сентябрь
	Янов Стан	Болотная растительность, темнохвойные вечнозеленые леса по долинам рек	
	Надым	Болотная растительность, темнохвойные вечнозеленые леса по долинам рек	
	Тарко-Сале	Лиственничные леса	
Северная тайга	Саранпауль	Болотная растительность, смешанные леса	Май–сентябрь
	Толька	Болотная растительность, лиственные леса	
	Березово	Темнохвойные, светлохвойные, смешанные леса	
	Халясавэй	Болотная растительность	
Средняя тайга	Октябрьское	Смешанные, темнохвойные	Май–сентябрь
	Няксимволь	Светлохвойные с присутствием лиственных, смешанных леса, болотная растительность	
	Ларьяк	Болотная растительность, лиственные леса	
	Ханты-Мансийск	Болотная растительность, светлохвойные леса	
	Угут	Болотная растительность, смешанные леса	
	Александровское	Пойменная растительность, болотная растительность, лиственные леса	
	Ванжиль-Кынак	Темнохвойные, смешанные леса, болотная растительность	
	Напас	Болотная растительность, смешанные леса	
	Леуши	Лиственные с присутствием смешанных леса, болотная растительность	
Средний Васюган	Болотная растительность, смешанные леса		
Южная тайга	Усть-Озерное	Болотная растительность, светлохвойные леса	Апрель–октябрь
	Колпашево	Болотная растительность, смешанные леса	
	Тобольск	Лиственные леса, луговая растительность, сосновые леса	
	Туринск	Смешанные леса	
	Бакчар	Смешанные леса, болотная растительность	
	Пудино	Болотная растительность, смешанные леса	
Подтайга	Тюмень	Лиственные леса, луговая растительность (есть пашни)	Апрель–октябрь
	Первомайское	луговая растительность, светлохвойные леса (есть пашни)	
	Тара	Лиственные леса, луговая растительность	
	Томск	Смешанные, светлохвойные леса, луговая растительность	
	Северное	Лиственные леса, луговая растительность	

пературы воздуха в 1982–2015 гг. (рис. 1) динамика параметров внутри указанного периода не имеет однонаправленных тенденций, хотя известно, что колебания сезонного значения NDVI находятся в зависимости от колебаний температуры воздуха в теплый период, в частности в весенние месяцы (Зуев и др., 2019). Значимых трен-

дов сезонной температуры воздуха ни в период 1982–1997 гг. ни в период 1997–2015 гг. в природных зонах региона не выявлено.

Торможение роста NDVI с 1997 г. отмечается во всем Северном полушарии, в особенности в Европе, Северной Америке и Центральной Сибири и связывается с уменьшением прихода к по-

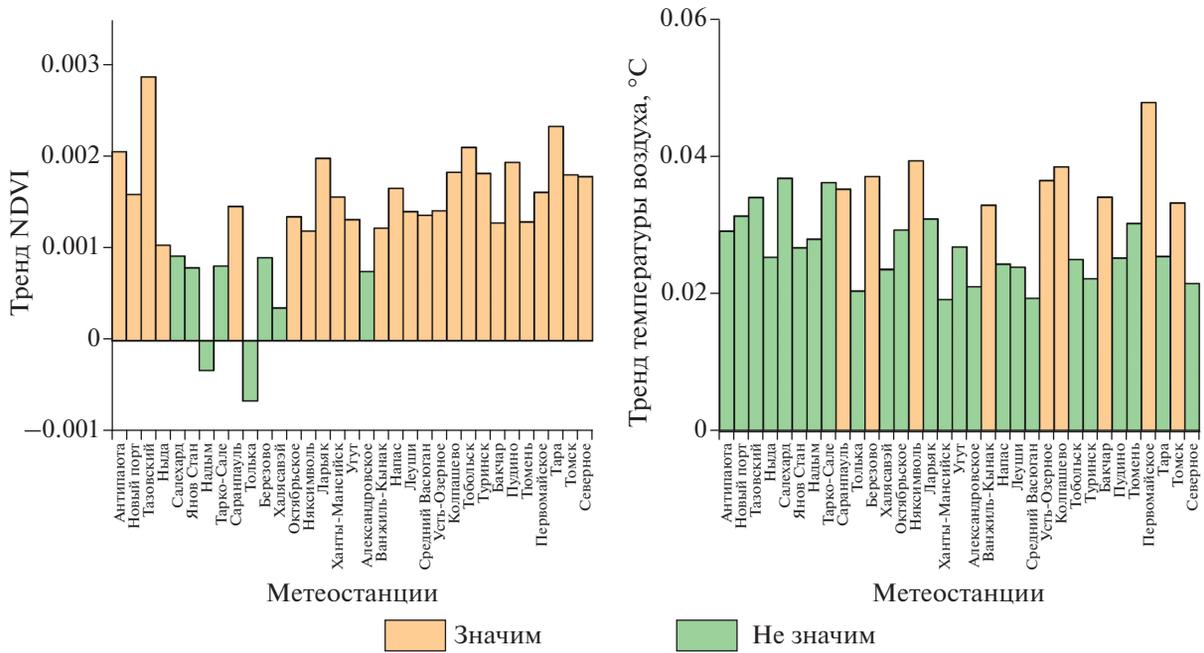


Рис. 1. Линейные тренды сезонного значения *a* – NDVI, *б* – температуры воздуха на метеостанциях региона за 1982–2015 гг.

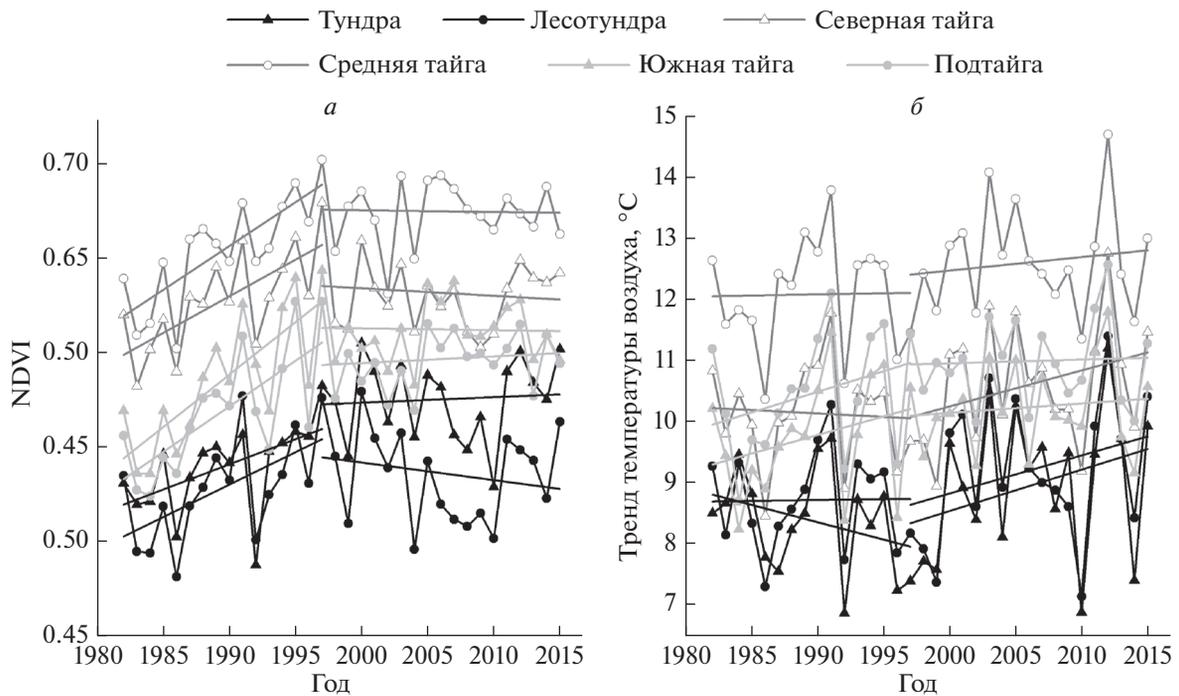


Рис. 2. Динамка сезонного значения *a* – NDVI, *б* – температуры воздуха в пределах природных зон региона 1982–2015 гг.

верхности Земли солнечной радиации и снижением запасов почвенной влаги (Kong et al., 2017). В 1997–1998 годах наблюдалось экстремально сильное явление Эль-Ниньо, а с конца 1990-х гг.

отмечается низкая фаза индекса температуры поверхности океана в регионе Эль-Ниньо – ONI на фоне снижения солнечной активности (Climate etc..., 2021). Таким образом, смена тенденции

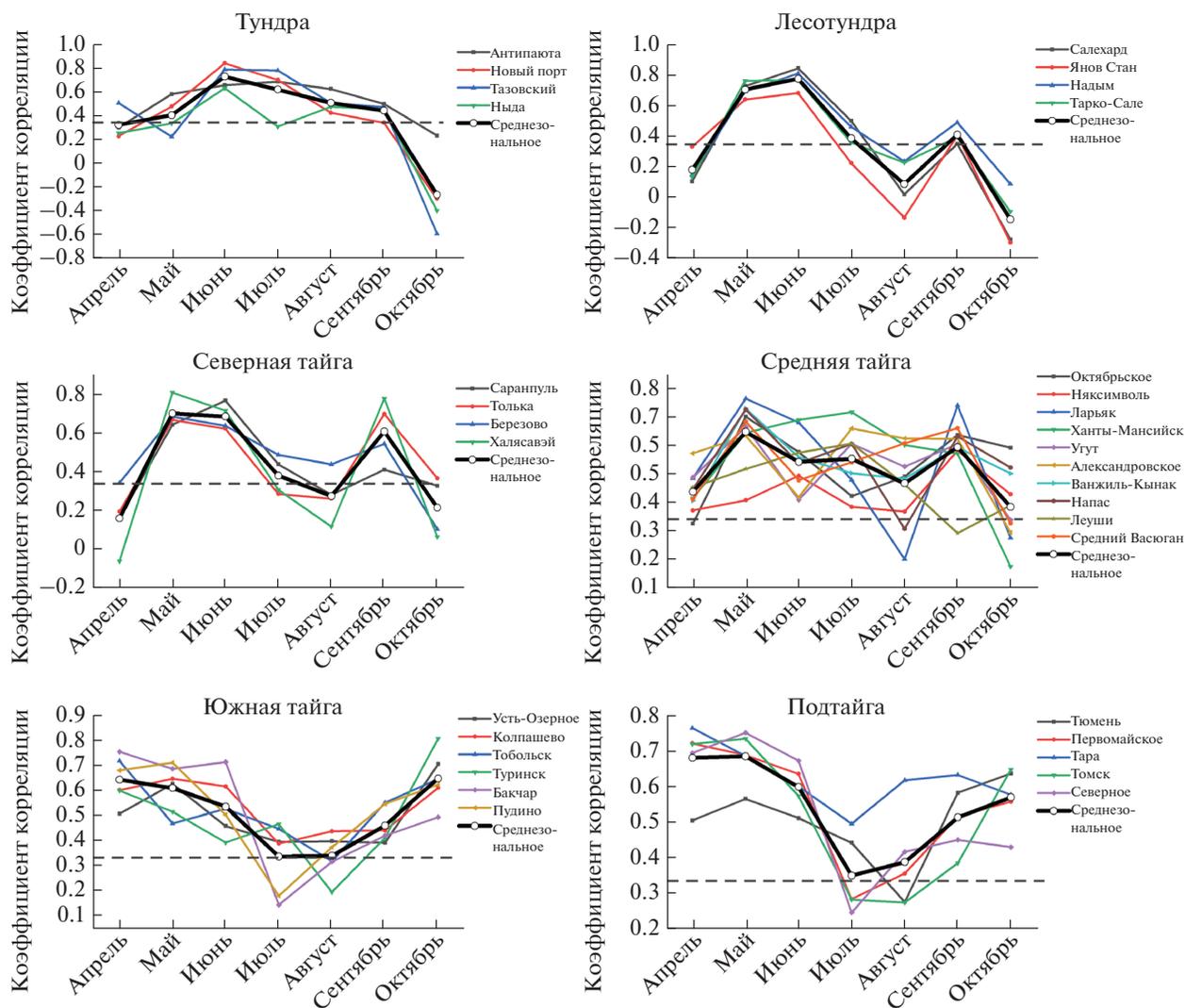


Рис. 3. Коэффициенты корреляции сезонного и месячного значений NDVI для рассматриваемых станций за период 1982–2015 гг., пунктиром обозначено критическое значение коэффициента корреляции при уровне значимости 0.05 ($r = 0.34$).

NDVI после 1997 г. может быть так же связана с низкой фазой ONI в результате уменьшения солнечной активности. Стоит отметить так же, что рост значений NDVI в период 1982–1997 гг. наблюдался в период высокой фазы ONI. Кроме того, прекращение роста значений NDVI происходит на фоне периода замедления глобального потепления, причины которого в настоящее время остаются дискуссионными (Володин, Грицун, 2018).

По результатам ранее проведенных исследований (Зуев и др., 2019) было установлено, что изменчивость сезонного значения NDVI на территории тайги и тундры Западной Сибири в значительной степени определяется изменчивостью NDVI в первый месяц теплого периода. Для детализации этого вывода рассмотрим коэффициен-

ты корреляции сезонного и месячного значений NDVI для всех отобранных станций (рис. 3).

Видно, что наибольший вклад в динамику сезонного значения NDVI вносят весенние и осенние месяцы – месяцы, когда температура воздуха является лимитирующим фактором фотосинтеза. На станциях тундры максимальные коэффициенты наблюдаются в первом месяце теплого периода – июне – и в основном показывают сильную корреляцию с сезонным значением NDVI ($r > 0.7$). На станциях лесотундры максимальные коэффициенты корреляции так же наблюдаются весной в мае–июне, связь так же является сильной, однако, появляется и осенний пик, приходящийся на сентябрь, значения которого варьируются на уровне значимости. На станциях северной тайги осенний пик более выражен, коэффициенты кор-

реляции, свидетельствующие о сильной и средней связи сезонного и месячного значений NDVI, характерны для мая, июня и сентября. В зоне средней тайги коэффициенты корреляции в течение теплого периода ведут себя неоднозначно. Среднерегиональное значение указывает на наличие майского и сентябрьского пиков, однако данные по станциям сильно разнятся. Так, например, для станций Ханты-Мансийск, Александровское и Леуши максимальные значения коэффициентов корреляции отмечаются в июле, для станции Няксимволь характерен только осенний пик в сентябре. На станциях южной тайги и подтайги ход коэффициентов корреляции так же в меньшей степени согласован по сравнению со станциями тундры, лесотундры и северной тайги, максимальные коэффициенты в среднем наблюдаются в апреле–мае и октябре. Таким образом, понятно, что наибольший вклад в изменение сезонного значения NDVI вносят осенние и весенние месяцы, когда основным фактором, лимитирующим фотосинтез, и, следовательно, влияющим на развитие растительности, является температура воздуха.

Если обобщить полученные результаты, то можно сделать вывод о том, что в среднем, месяцами, вносящими наибольший вклад в динамику сезонного значения NDVI, являются: июнь – для тундры, май и сентябрь – для лесотундры, северной и средней тайги, апрель и октябрь – для южной тайги и подтайги. Максимальные значения NDVI для рассматриваемой территории наблюдаются в летние месяцы (Зуев и др., 2019), соответственно на формирование растительности в летний период текущего года влияние оказывают метеорологические условия лета и предшествующей весны. Таким образом, для дальнейшего анализа были использованы данные NDVI за весенние месяцы, вносящие наибольший вклад в изменение сезонного значения NDVI, а также температура воздуха в весенние месяцы. Для оценки изменений вклада температурного фактора в развитие растительности на рассматриваемой территории рассчитывались коэффициенты корреляции NDVI и температуры воздуха для территории каждой станции за 2 периода – 1981–1997 и 1998–2015 гг. Использовались месячные значения NDVI за июнь для тундры, май для лесотундры, северной и средней тайги, апрель для южной тайги и подтайги. Наиболее показательными оказались коэффициенты корреляции месячных значений NDVI с температурой воздуха, осредненной за 2 месяца – май–июнь для тундры, апрель–май для лесотундры, северной и средней тайги, март–апрель для южной тайги и подтайги.

Результаты корреляционного анализа представлены на рис. 4. Видно, что на станциях зоны тундры, коэффициенты корреляции NDVI и температуры воздуха в период 1997–2015 гг. по срав-

нению с предыдущим периодом прирастают, что свидетельствует о росте вклада температуры воздуха весенних месяцев в процесс развития растительности данных территорий. Наиболее чувствителен к температуре воздуха растительный покров южной тундры – в районе станций Новый Порт, Тазовский и Ныда, для которого характерна кустарниковая и кустарничковая растительность. Растительность же в районе станции Антипаюта, относящейся к зоне северной тундры с преобладанием мохово-лишайникового покрова в летне-весенний период в меньшей степени зависима от температуры воздуха, однако, коэффициент корреляции NDVI и температуры в 1997–2015 гг. становится значимым.

Противоположные тенденции характерны для зоны лесотундры – коэффициенты корреляции весенних значений NDVI и температуры воздуха в период 1997–2015 гг. снижаются относительно предыдущего периода. Для районов рассматриваемых станций зоны лесотундры характерны преимущественно болотные ландшафты с вкраплениями темнохвойных, лиственничных и смешанных лесов и открытые водные поверхности. В зоне северной тайги снижение коэффициентов корреляции в период 1997–2015 гг. характерно так же для заболоченных районов станций Халясавэй и Толька, расположенных в восточной части региона. Отметим, что для заболоченных территорий вышеупомянутых станций характерны незначимые положительные, а в некоторых случаях отрицательные тренды NDVI за весь период наблюдений при положительных трендах температуры воздуха (рис. 1). Известным эффектом потепления в северных районах Западной Сибири является таяние вечной мерзлоты и образование термокарстовых озер, вследствие чего площадь водных поверхностей на заболоченных территориях увеличивается (Manasurov, 2014). Вследствие этого процесса снижается доля поверхностей, покрытых растительностью, что приводит к снижению NDVI и соответствующему снижению корреляции NDVI с температурой воздуха. Растительность в районах расположенных на левобережье Оби станций Березово и Саранпауль с преобладанием сосновых лесов в 1997–2015 гг. наоборот отвечает на потепление ростом продуктивности – при значимых положительных трендах сезонной температуры воздуха на этих станциях (рис. 1, б) наблюдается повышение коэффициента корреляции между весенними значениями NDVI и температуры воздуха.

Снижение вклада весенней температуры воздуха в развитие растительности весной в 1997–2015 гг. характерно для районов станций средне-таежной зоны, расположенных на правобережье Оби – Ларьяк, Напас, Ванжиль-Кынак; растительность этих территорий представлена смешанными лесами и болотными сообществами. Для районов

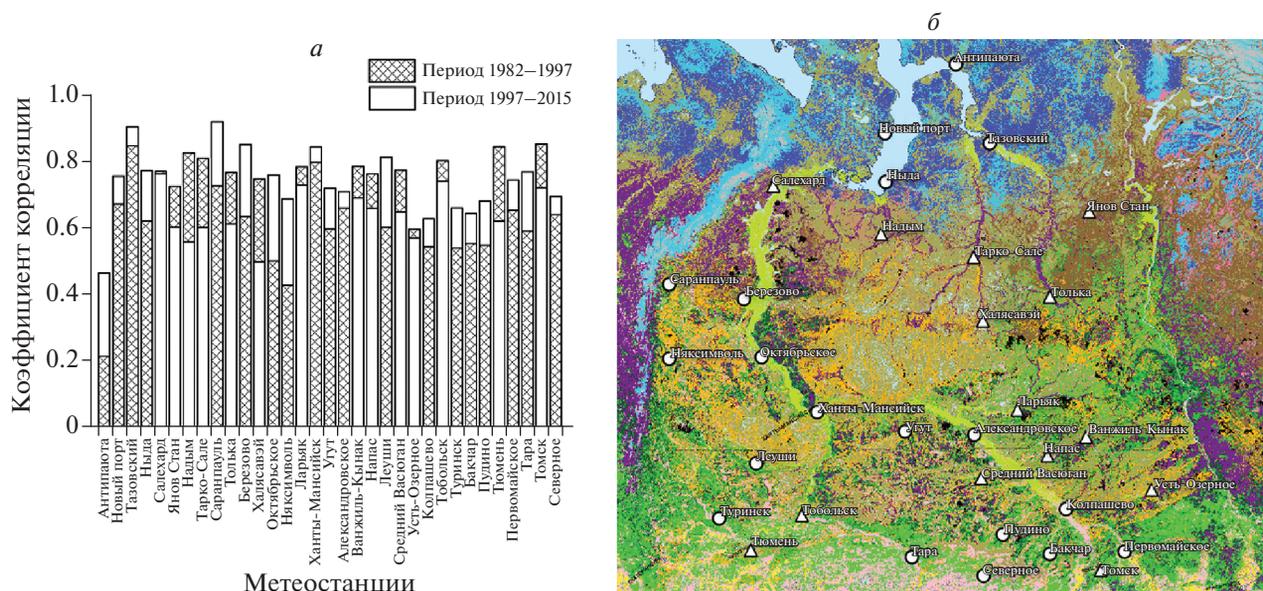


Рис. 4. Коэффициенты корреляции весенних значений NDVI и температуры воздуха на станциях региона, *а* – коэффициенты корреляции в периоды 1982–1997 и 1997–2015, *б* – распределение растущих (красный) и падающих (синий) коэффициентов корреляции на карте растительности (Барталев и др., 2011).

станций среднетаежной зоны, расположенных на севере Васюганской равнины с преобладанием болотной растительности и темнохвойных лесов (Угут, Александровское, за исключением станции Средний Васюган) и правобережье Иртыша (Ханты-Мансийск – болотная растительность с сосновыми лесами, Леуши – смешанные леса) наблюдается увеличение коэффициента корреляции весенних значений NDVI и температуры воздуха в 1997–2015 гг.

Растительность в зонах южной тайги и подтайги преимущественно отвечает на потепление увеличением связи продуктивности с температурой воздуха, хотя тренды как сезонного значения NDVI, так и температуры этих зонах в 1997–2015 гг. близки к нулю. Так, территории с произрастанием смешанных лесов в районе станции Туринск, а также заболоченные территории с произрастанием смешанных лесов в районах станций, расположенных на юге Васюганской и Кетско-Тымской равнин (Колпашево, Бакчар, Пудино), показывают увеличение связи между весенними значениями NDVI и температуры воздуха в 1997–2015 гг. Исключением являются районы станций Усть-Озерное (заболоченные территории с сосновыми и кедровыми лесами) и Тобольск (заболоченные территории со смешанными лесами), хотя коэффициенты корреляции для этих станций в 1982–1997 и 1997–2015 гг. близки по величине. Растительность южнотаежных территорий, представленная преимущественно лиственными лесами и лугами демонстрирует увеличение связи между весенними значениями NDVI и температуры воз-

духа в 1997–2015 гг. (районы станций Тара, Северное, Первомайское), однако, для районов станций Томск и Тюмень характерно снижение этой связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного анализа удалось установить, что линейные тренды сезонного значения NDVI в 1982–2015 для всех исследуемых районов Западно-Сибирской равнины преимущественно положительны, как и тренды температуры воздуха. Однако, с конца XX века рост сезонных значений NDVI в пределах природных зон исследуемого региона прекращается. Рост значений NDVI в 1982–1997 гг. и их стабилизация в 1997–2015 гг. происходят на фоне наблюдаемого эффекта замедления глобального потепления, уменьшения солнечной активности и смены фаз температуры поверхности океана в регионе Эль-Ниньо – ONI с положительной на отрицательную.

В зонах тундры и лесотундры значимый вклад в вариации сезонного значения NDVI вносит развитие растительности в весенне-летние месяцы, в зонах северной, средней, южной тайги и подтайги – в весенние осенние месяцы, однако, максимальные летние значения NDVI определяются условиями предшествующей весны.

По результатам сравнительного анализа между фазами роста (1982–1997 гг.) и стабилизации (1997–2015 гг.) сезонного значения NDVI было выявлено, что реакция различных типов растительности Западно-Сибирской равнины на по-

тепление различна. Так, связь продуктивности растительности тундры, и в особенности южной тундры, с температурой воздуха возрастает в период 1997–2015 гг., что свидетельствует о возрастающей чувствительности растительности тундры к потеплению. На заболоченных территориях лесотундры и северной тайги проявляются противоположные тенденции — в связи с потеплением и таянием вечной мерзлоты эти территории заболачиваются еще больше, появляется больше водных пространств, что негативно сказывается на продуктивности растительности, вследствие чего связь NDVI с температурой воздуха снижается. В целом в зонах от лесотундры до подтайги Обь-Енисейского междуречья в большинстве случаев связь NDVI с температурой воздуха в 1997–2015 гг. снижается, а на территории левобережья Оби до Уральских гор, наоборот, возрастает.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300156-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеева М.Н., Яценко И.Г.* Экологический мониторинг нефтедобывающих территорий на основе космических снимков // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. Т. 4. № 2. С. 101–106.
- Барталев С.А. и др.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
- Белоновская Е.А. и др.* “Позеленение” Российской Арктики и современные тренды изменения ее биоты // Известия РАН. Серия географическая. 2016. № 3. С. 28–39.
- Бульгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швеиц Н.В.* Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485. <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных>.
- Володин Е.М., Грицун А.С.* О природе замедления глобального потепления в начале XXI в. // Докл. АН. 2018. Т. 482. № 3. С. 315–318.
- Елсаков В.В., Телятников М.Ю.* Межгодовые изменения индекса NDVI на территории Европейского северо-востока России и Западной Сибири в условиях климатических флуктуаций последних десятилетий // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 260–271.
- Зув В.В., Короткова Е.М., Павлинский А.В.* Климатически обусловленные изменения растительного покрова тайги и тундры Западной Сибири в 1982–2015 гг. по данным спутниковых наблюдений // Исследование Земли из космоса. 2019. № 6. С. 66–76.
- Кобзарь С.К., Перемитина Т.О., Яценко И.Г.* Анализ состояния растительности нефтедобывающих территорий Томской области с применением данных дистанционного зондирования // Опт. атм. и океана. 2016. Т. 29. № 5. С. 414–418.
- Коркина Е.А., Талышева О.Ю.* Антропогенная трансформация природных ландшафтов в зоне техногенеза нефтедобывающей промышленности Среднего Приобья // Известия СамНЦ РАН. 2015. Т. 17. № 5. С. 40–44.
- Титкова Т.Б., Виноградова В.В.* Отклик растительности на изменение климатических условий в бореальных и субарктических ландшафтах в начале XXI века // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 75–86.
- Шарикалов А.Г., Якутин М.В.* Динамика лесных экосистем на территориях месторождений углеводородного сырья в подзоне северной тайги Западной Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. Т. 2. № 3. С. 61–66.
- Beck P., Goetz S.* Satellite observations of high northern latitude vegetation productivity changes between 1982 and 2008: ecological variability and regional differences // Environmental Research Letters. 2011. V. 6. P. 045501.
- Bhatt U. et al.* Changing seasonality of panarctic tundra vegetation in relationship to climatic variables // Environmental Research Letters. 2017. V. 12. P. 055003.
- Buermann W., Parida B., Jung M., MacDonald G.M., Tucker C.J., Reichstein M.* Recent shift in Eurasian boreal forest greening response may be associated with warmer and drier summers // Geophysical Research Letters. 2014. V. 41. P. 1995–2002.
- Climate etc [Электронный ресурс]. URL: <https://judithcurry.com/2019/09/01/enso-predictions-based-on-solar-activity/> (дата обращения 5.04.2021)
- Cohen J., Screen J.A., Furtado J.C., Barlow M., Whittleston D.* The relationship between recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather // Nature Geoscience. 2014. V. 7. P. 627–637.
- Epstein H. et al.* Dynamics of aboveground phytomass of the circumpolar Arctic tundra during the past three decades // Environmental Research Letters. 2012. V. 7. P. 015506.
- Kong D., Zhang Q., Singh V.P., Shi P.* Seasonal vegetation response to climate change in the Northern Hemisphere (1982–2013) // Global and Planetary Change. 2017. V. 148. P. 1–8.
- Manasyrov R.M., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Shirokova L.S.* Thermokarst lake waters across the permafrost zones of western Siberia // The Cryosphere. 2014. V. 8. № 4. P. 1177–1193.
- Marshall M., Okuto E., Kang Y., Opiyo E., Ahmed M.* Global assessment of vegetation index and phenology lab (VIP) and global inventory modeling and mapping studies (GIMMS) version 3 products // Biogeosciences. 2016. V. 13. № 3. P. 625–639. <https://doi.org/10.5194/bgd-12-9081-2015>
- Miao C. et al.* Assessment of CMIP5 climate models and projected temperature changes over Northern Eurasia. Environ. Res. Lett. 2014. V. 9. P. 1–12. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/5/055007>
- Miles M., Miles V., Esau I.* Varying climate response across the tundra, forest-tundra and boreal forest biomes in northern West Siberia // Environmental Research Letters. 2019. V. 14. P. 075008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab2364>
- Miles V., Esau I.* Spatial heterogeneity of greening and browning between and within bioclimatic zones in northern

- west Siberia // *Environmental Research Letters*. 2016. V. 11. P. 115002.
- Piao S. et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years // *Global change biology*. 2015. V. 21. № 4. P. 1601–1609.
- Piao S.L., Wang X., Ciais P., Zhu B., Wang T., Liu J. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982–2006 // *Global Change Biology*. 2011. V. 17. P. 3228–3239.
- Piao S.L. et al. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming // *Nature*. 2008. V. 451. P. 49–53.
- Pinzon J.E., Tucker C.J. A Non-Stationary 1981–2012 AVHRR NDVI3g Time Series // *Remote Sens*. 2014. V. 6. № 8. P. 6929–6960.
<https://doi.org/10.3390/rs6086929>
- Seddon A.W.R., Macias-Fauria M., Long P.R., Benz D., Willis K.J. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability // *Nature*. 2016. V. 531. № 7593. P. 229–232.
- Seidl R. et al. Forest disturbances under climate change // *Nat. Clim. Change*. 2017. V. 7. № 6. P. 395–402.
- Tian F., Fensholt R., Verbesselt J., Grogan K., Horion S., Wang Y. Evaluating temporal consistency of long-term global NDVI datasets for trend analysis // *Remote Sens. Environ*. 2015. V. 163. 326–340.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.03.031>
- Walker D. et al. Spatial and temporal patterns of greenness on the Yamal Peninsula, Russia: interactions of ecological and social factors affecting the arctic normalized difference vegetation index // *Environ. Res. Lett*. 2009. V. 4. P. 045004.
- Wang X., Piao S., Ciais P., Li J., Friedlingstein P., Koven C., Chen A. Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in North America from 1982 to 2006 // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2011. V. 108. № 4. P. 1240–1245.

The Response of the West Siberian Plain Vegetation Cover to Climate Change in 1982–2015

E. M. Korotkova^{1, 2} and V. V. Zuev¹

¹*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Tomsk, Russia*

²*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

The work is devoted to the study of the response of different types of vegetation cover of the West Siberian Plain to the temperature changes observed in recent decades. The paper analyzes the trends in the series of the vegetation index NDVI and air temperature in the areas of meteorological stations of the West Siberian Plain, characterized by different vegetation types. The phases of growth (1982–1997) and stabilization (1997–2015) of NDVI values were identified against the background of the observed effects: global warming slowdown, decrease in solar activity and change in the phases of the ocean surface temperature in the El Niño region (ONI) from positive to negative. It is shown that the spring months make the main contribution to the variations in the seasonal NDVI value. Correlation analysis of spring NDVI and air temperature values during the periods of growth and stabilization of NDVI was carried out. It is shown that the nature of the response of vegetation to the observed increase in temperature depends on its type and location. Thus, the relationship between NDVI and air temperature in the tundra zone increases, in highly swampy areas of the forest-tundra and northern taiga it decreases, in the territory of the Ob-Yenisei interfluvium from forest tundra to subtaiga in most cases it decreases, and in the territory of the left bank of the Ob it increases.

Keywords: vegetation cover, NDVI, air temperature, climate change, Western Siberia

REFERENCES

- Alekseeva M.N., Yashchenko I.G. Ekologicheskij monitoring nefte dobyvayushchih territorij na osnove kosmicheskijh snimkov // *Interesko Geo-Sibir*. 2013. T. 4. № 2. S. 101–106. (In Russian)
- Bartalev S.A. et al. Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektrometriya MODIS // *Sovrem. probl. dist. zondir. Zemli iz kosmosa*. 2011. T. 8. № 4. S. 285–302. (In Russian)
- Belonovskaya E.A. et al. "Pozelenenie" Rossijskoj Arktiki i sovremennye trendy izmeneniya ee bioty // *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. 2016. № 3. S. 28–39. (In Russian)
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Trofimenko L.T., Shvec N.V. Opisaniye massiva dannyh srednemesyachnoj temperatury vozduha na stanciyah Rossii. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh № 2014621485.
<http://meteo.ru/data/156-temperature#opisanie-massiva-dannyh>. (In Russian)
- Volodin E.M., Gricun A.S. O prirode zamedleniya global'nogo potepleniya v nachale XXI v. // *Doklady Akademii Nauk*. 2018. T. 482. № 3. S. 315–318. (In Russian)
- Elsakov V.V., Telyatnikov M.Yu. Mezhdodovye izmeneniya indeksa NDVI na territorii Evropejskogo severo-vostoka Rossii i Zapadnoj Sibiri v usloviyah klimaticheskijh fluktuacij poslednijh desyatiletij // *Sovrem. probl. dist. zondir. Zemli iz kosmosa*. 2013. T. 10. № 3. S. 260–271. (In Russian)
- Zuev V.V., Korotkova E.M., Pavlinskij A.V. Klimaticheski obuslovlennye izmeneniya rastitel'nogo pokrova tajgi i tundry Zapadnoj Sibiri v 1982–2015 gg. po dannym sputnikovyh nablyudenij // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2019. № 6. S. 66–76. (In Russian)
- Kobzar' S.K., Peremitina T.O., Yashchenko I.G. Analiz

- sostoyaniya rastitel'nosti nefte dobyvayushchih territorij Tomskoj oblasti s primeneniem dannyh distancionnogo zondirovaniya // Opt. atm. i okeana. 2016. T. 29. № 5. S. 414–418. (In Russian)
- Korkina E.A., Talyneva O.Yu.* Antropogennaya transformaciya prirodnyh landshaftov v zone tekhnogeneza nefte dobyvayushchej promyshlennosti Srednego Priob'ya // Izvestiya SamNC RAN. 2015. T. 17. № 5. S. 40–44. (In Russian)
- Titkova T.B., Vinogradova V.V.* Otklik rastitel'nosti na izmenenie klimaticheskikh uslovij v boreal'nyh i subarkticheskikh landshaftah v nachale XXI veka // Sovrem. probl. dist. zondir. Zemli iz kosmosa. 2015. T. 12. № 3. S. 75–86. (In Russian)
- Sharikalov A.G., Yakutin M.V.* Dinamika lesnyh ekosistem na territoriyah mestorozhdenij uglevodorodnogo syr'ya v podzone severnoj tajgi Zapadnoj Sibiri // Interespo Geo-Sibir'. 2012. T. 2. № 3. S. 61–66. (In Russian)
- Beck P., Goetz S.* Satellite observations of high northern latitude vegetation productivity changes between 1982 and 2008: ecological variability and regional differences // Environmental Research Letters. 2011. V. 6. P. 045501.
- Bhatt U. et al.* Changing seasonality of panarctic tundra vegetation in relationship to climatic variables // Environmental Research Letters. 2017. V. 12. P. 055003.
- Buermann W., Parida B., Jung M., MacDonald G.M., Tucker C.J., Reichstein M.* Recent shift in Eurasian boreal forest greening response may be associated with warmer and drier summers // Geophysical Research Letters. 2014. V. 41. P. 1995–2002.
- Climate etc [Electronic resource]. URL: <https://judithcurry.com/2019/09/01/enso-predictions-based-on-solar-activity/> (application date 5.04.2021)
- Cohen J., Screen J.A., Furtado J.C., Barlow M., Whittleston D.* The relationship between recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather // Nature Geoscience. 2014. V. 7. P. 627–637.
- Epstein H. et al.* Dynamics of aboveground phytomass of the circumpolar Arctic tundra during the past three decades // Environmental Research Letters. 2012. V. 7. P. 015506.
- Kong D., Zhang Q., Singh V.P., Shi P.* Seasonal vegetation response to climate change in the Northern Hemisphere (1982–2013) // Global and Planetary Change. 2017. V. 148. P. 1–8.
- Manasypov R.M., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Shirokova L.S.* Thermokarst lake waters across the permafrost zones of western Siberia // The Cryosphere. 2014. V. 8. № 4. P. 1177–1193.
- Marshall M., Okuto E., Kang Y., Opiyo E., Ahmed M.* Global assessment of vegetation index and phenology lab (VIP) and global inventory modeling and mapping studies (GIMMS) version 3 products // Biogeosciences. 2016. V. 13. № 3. P. 625–639.
- <http://dx.doi.org/10.5194/bgd-12-9081-2015>
- Miao C. et al.* Assessment of CMIP5 climate models and projected temperature changes over Northern Eurasia. Environ. Res. Lett. 2014. V. 9. P. 1–12. DOI: 10.1088/1748-9326/9/5/055007
- Miles M., Miles V., Esau I.* Varying climate response across the tundra, forest–tundra and boreal forest biomes in northern West Siberia // Environmental Research Letters. 2019. V. 14. P. 075008. DOI: 10.1088/1748-9326/ab2364
- Miles V., Esau I.* Spatial heterogeneity of greening and browning between and within bioclimatic zones in northern west Siberia // Environmental Research Letters. 2016. V. 11. P. 115002.
- Piao S. et al.* Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years // Global change biology. 2015. V. 21. № 4. P. 1601–1609.
- Piao S.L., Wang X., Ciais P., Zhu B., Wang T., Liu J.* Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982–2006 // Global Change Biology. 2011. V. 17. P. 3228–3239.
- Piao S.L. et al.* Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming // Nature. 2008. V. 451. P. 49–53.
- Pinzon J.E., Tucker C.J.* A Non-Stationary 1981–2012 AVHRR NDVI3g Time Series // Remote Sens. 2014. V. 6. № 8. P. 6929–6960. DOI: 10.3390/rs6086929
- Seddon A.W.R., Macias-Fauria M., Long P.R., Benz D., Willis K.J.* Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability // Nature. 2016. V. 531. № 7593. P. 229–232.
- Seidl R. et al.* Forest disturbances under climate change // Nat. Clim. Change. 2017. V. 7. № 6. P. 395–402.
- Tian F., Fensholt R., Verbesselt J., Grogan K., Horion S., Wang Y.* Evaluating temporal consistency of long-term global NDVI datasets for trend analysis // Remote Sens. Environ. 2015. V. 163. 326–340. DOI: 10.1016/j.rse.2015.03.031
- Walker D. et al.* Spatial and temporal patterns of greenness on the Yamal Peninsula, Russia: interactions of ecological and social factors affecting the arctic normalized difference vegetation index // Environ. Res. Lett. 2009. V. 4. P. 045004.
- Wang X., Piao S., Ciais P., Li J., Friedlingstein P., Koven C., Chen A.* Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in North America from 1982 to 2006 // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2011. V. 108. № 4. P. 1240–1245.